

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění a montáže

Vliv technologie obrábění na odchylky kruhovitosti

Machining Technology Influence on Roundness Deviation

Student:

Bc. Martin Vaňura

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.

Ostrava 2011

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Vaňura**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie
Téma: **Vliv technologie obrábění na odchylky kruhovitosti**
Machining Technology Influence on Roundness Deviation

Zásady pro vypracování:

1. Přehled současného stavu dané problematiky.
2. Rozbor technologií obrábění.
3. Experimentální ověření.
4. Zhodnocení experimentů.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ADAMCZAK, S. *Odniesieniowe metody pomiaru okragłości części maszyn*. Kielce : Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 1998. 181 s. PL ISSN 0239-4979.
- [2] JOCHMAN, A.; ADAMČÁK, M.; PAČEK, J. *Valivé ložiská*. Bratislava : Alfa Bratislava, 1983. 197 s. 063-757-87.
- [3] OČENÁŠOVÁ, L. *Príspevok k hodnoteniu odchýlky kruhovitosti pri meraní na súradnicovom meracom stroji*. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline – Strojnícka fakulta - Dizertačná práca, 2008.
- [4] PERNIKÁŘ, J.; TYKAL, M.; VAČKÁŘ, J. *Jakost a metrologie, Část metrologie*. Brno : VUT v Brne, 2004. 151 s. ISBN 80-214-199-0.
- [5] VASILKO, K.; HAVRILA, M.; MARCINČIN-NOVÁK, J.; MÁDL, J.; ZAJAC, J. *Top trendy v obrábění, III. část – Technologie obrábění*. Žilina : Media/ST, s.r.o., Žilina, 2006. 214 s. ISBN 80-968954-2-7.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

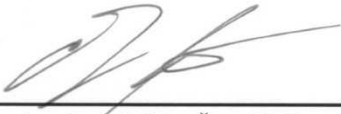
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.**


Konzultant diplomové práce: Ing. Lenka Čepová, Ph.D.

Datum zadání: 17.12.2010

Datum odevzdání: 23.05.2011




doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Farana, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 23.5.2011

Vaňura

podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména § 35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 - školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB - TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB - TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo - diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 11/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 23.5.2011

Vaňura
.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Martin Vaňura

Adresa trvalého pobytu autora práce: Vítězná 1746

756 61 Rožnov pod Radhoštěm

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

VAŇURA, M. *Vliv technologie obrábění na odchylky kruhovitosti*: Katedra obrábění a montáže, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2011, 64 stran, 3 přílohy.

Diplomová práce, vedoucí: doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.

Tato diplomová práce obsahuje přehled poznatků o hodnocení a měření úchylek kruhovitosti. V teoretické části jsou popsány úchylky kruhovitosti, příčiny jejich vzniku, způsoby měření a vyhodnocení, měřicí zařízení atd. Experimentální část je věnována měření úchylky kruhovitosti ložiskových kroužků, obrobených různými technologiemi obrábění – soustružením, broušením a honováním. Cílem práce je vzájemné porovnání vlivu těchto technologií obrábění na úchylky kruhovitosti. Měření bylo uskutečněno na ložiskových kroužcích z chromové oceli pro valivá ložiska 100Cr6, ve spolupráci se společností Koyo Bearings Česká republika s.r.o., na měřicím přístroji MAHR Formtester MMQ 44 CNC.

ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

VAŇURA, M. *Machining Technology Influence on Roundness Deviation*: Department of Machining and Assembly, Faculty of Mechanical Engineering VŠB – Technical University of Ostrava, 2011, 64 pages, 3 appendixes.

Diploma thesis tutor: doc. Ing. Robert Čep, Ph.D.

This diploma thesis includes summary of roundness deviation knowledges according to evaluation and measurement. In teoretic part are described roundness deviations, causes of their origin, ways of measurement and evaluation, measuring machines etc. Experimental part includes roundness deviation measurement of bearings, cutted by different machining technology – turning, grinding and honing. The main target of thesis is relative comparison influenece on roundness deviation by these machining technologies. The measurement was provided on bearing rings of chrome steel for rolling bearings 100Cr6, in cooperation with Koyo Bearings Česká republika s.r.o. company, on the measuring machine MAHR Formtester MMQ 44 CNC.

Obsah diplomové práce

Obsah diplomové práce.....	1
Seznam použitého značení	2
1 Úvod	4
2 Společnost Koyo Bearings Česká republika s.r.o.	5
3 Přehled současného stavu měření úchylky kruhovitosti.....	7
3.1 Geometrické tolerance	7
3.2 Normy týkající se hodnocení úchylky kruhovitosti.....	10
3.3 Úchylky geometrického tvaru	14
3.4 Úchylka kruhovitosti	16
3.5 Metody měření úchylky kruhovitosti	20
3.5.1 Spojité metody	21
3.5.2 Nespojité (diskrétní) metody	29
3.6 Měřicí zařízení na měření úchylky kruhovitosti.....	30
3.6.1 Konvenční měřicí přístroje	30
3.6.2 Souřadnicové měřicí stroje	31
3.7 Analýza harmonických složek profilu	34
3.8 Chyby měření	36
3.9 Nejistoty měření	38
4 Experimentální sledování úchylek kruhovitosti	40
4.1 Zkoumané součásti	40
4.2 Měření úchylky kruhovitosti	43
4.2.1 Konvenční měřicí přístroj Mahr Formtester MMQ 44 CNC.....	43
4.2.2 Podmínky měření.....	47
4.3 Výsledky měření.....	47
5 Vyhodnocení.....	59
6 Závěr.....	61
Seznam použité literatury	62
Seznam příloh	64

Seznam použitého značení

Symbol	Význam	Jednotka
a	x-ová souřadnice excentricity	(mm)
A	referenční kružnice	
a_1	kladná místní úchylka	(μm)
A_1	kružnice, nebo válec se středem C_1 nebo osou Z_1	
a_2	záporná místní úchylka	(μm)
A_2	kružnice, nebo válec se středem C_2 nebo osou Z_2	
a_p	hloubka řezu	(mm)
b	y-ová souřadnice excentricity	(mm)
c	z-ová souřadnice excentricity	(mm)
C_1	střed kružnice A_1	
C_2	střed kružnice A_2	
CMM	souřadnicový měřicí stroj (Coordinate Measuring Machine)	
CNC	počítačem řízený systém (Computer Numerical Control)	
D_1	rozměr součásti	(mm)
D_2	rozměr součásti	(mm)
f	posuv	(mm)
GPS	geometrická specifikace výrobku (Geometrical Product Specification)	
HRC	tvrdost podle Rockwella	(HRC)
ISO	mezinárodní označení norem	
LRD	místní úchylka kruhovitosti	(μm)
$LSCI$	střední kružnice nejmenších čtverců (last squares mean circle – LSCI)	
$MCCI$	nejmenší opsaná kružnice (minimum circumscribed circle – MCCI)	
$MICI$	největší vepsaná kružnice (maximum inscribed circle – MICI)	
$MZCI$	nejmenší pásmo – mezikruží (minimum zone circles – MZCI)	
r	poloměr zaoblení hrotu snímače	(mm)
R_{max}	maximální vzdálenost poloměru kružnice	(mm)

Symbol	Význam	Jednotka
R_{min}	minimální vzdálenost poloměru kružnice	(mm)
$RONp$	největší vrchol úchylky kruhovitosti (peak-to-reference roundness deviation – LSCI)	(μm)
$RONq$	střední kvadratická hodnota úchylky kruhovitosti (root mean square roundness deviation - LSCI)	(μm)
$RONt$	rozkmít úchylek kruhovitosti (peak-to-valley roundness deviation – MZCI, LSCI, MCCI, MICI)	(μm)
$RONv$	největší prohlubeň úchylky kruhovitosti (reference-to-vale roundness deviation – LSCI)	(μm)
r_ϵ	poloměr zaoblení hrotu nástroje	(mm)
t	teplota	($^{\circ}\text{C}$)
u_p	přesnost měřicího zařízení	(μm)
UPR	vlna za otáčku (undulations per revolution)	
vc	řezná rychlost	($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)
x, y, z	souřadnicové osy	
\emptyset	průměr součásti	(mm)
α, β	úhly	($^{\circ}$)
Δr_1	radiální vzdálenost	(μm)
Δr_2	radiální vzdálenost	(μm)
Δz	úchylka kruhovitosti	(μm)
ΔZ_c	nejmenší opsaná kružnice	(μm)
ΔZ_i	největší vepsaná kružnice	(μm)
ΔZ_q	střední kružnice nejmenších čtverců	(μm)
ΔZ_z	nejmenší pásmo - mezikruží	(μm)
θ	okamžitý úhel profilu kruhovitosti	($^{\circ}$)
κ_r	nástrojový úhel nastavení hlavní řezné hrany	($^{\circ}$)
$3D$	prostorové zobrazení	

1 Úvod

Současný technologický proces v oblasti strojírenství umožňuje stálou kontrolu povrchu součástí během její výroby v široké škále odvětví, která je potřebná pro dosažení požadované kvality výrobků. Geometrická struktura součástí obsahuje soustavu geometrických prvků určujících tvar, rozměr, tvarovou a rozměrovou přesnost, vzájemnou polohu, tj. vlnitost, drsnost apod. Všechny tyto parametry jsou závislé na použité technologii výroby, parametrech výrobního zařízení, vlastnostech materiálu, ale samozřejmě také na samotném člověku. Každý parametr z těchto prvků se projeví v celkové přesnosti součásti tvarové přesnosti. Jelikož ve výrobním procesu působí celá řada nepříznivých vlivů, není možné vyrobit součást ideálního tvaru. Jedním těchto z prvků tvarové přesnosti u rotačních součástí je kruhovitost. Na tomto základě rotační součásti vykazují úchyly kruhovitosti od ideálního tvaru.

Jeden z nejsledovanějších parametrů kvality valivých ploch při výrobě valivých ložisek je úchylka kruhovitosti. Společně s drsností povrchu mají vliv na úroveň hluku a vibrací při provozu samotného ložiska a tím i na kvalitu celého zařízení, ve kterém jsou ložiska namontována. V dnešní době jsou ve strojírenství kladeny vysoké požadavky na kvalitu a je celková snaha o minimalizaci chyb a nepřesností tvaru nejen kruhových ploch. Proto je také věnována vysoká pozornost na zdokonalování metod hodnocení úchyly kruhovitosti a měřicí techniky. Moderní technologické postupy vyžadují neustálou kontrolu kvality vyráběných povrchů, čehož je možno docílit jedinečně stále se opakujícími měřeními. Tyto měření se provádí použitím vhodných měřicích zařízení, umožňujících dosažení potřebné přesnosti při hodnocení úchyly kruhovitosti.

Pro měření úchylek kruhovitosti je v praxi využíváno spousty metod, ale není věnovaná dostatečná pozornost hodnocení úchylek kruhovitosti v závislosti na použité technologii obrábění. Diplomová práce poukazuje na tuto problematiku a je zaměřena na hodnocení úchylek kruhovitosti kroužků chromové oceli pro valivá ložiska 100Cr6 (ČSN 41 4109) po obrábění různými technologiemi. Byla hodnocena změna úchyly kruhovitosti při výrobě ložiskových kroužků ve společnosti Koyo Bearings Česká republika s.r.o.

2 Společnost Koyo Bearings Česká republika s.r.o.

Koyo Bearings, jako součást korporace JTEKT, se řadí mezi světové špičky ve výrobě ložisek a automobilových řídících systémů. Díky udržování trvale vysoké kvality a výkonu svých výrobků se Koyo prosadila mezi průmyslovými výrobci a výrobci automobilů na celém světě. Koyo Bearings vlastní a provozuje osmnáct závodů pro výrobu ložisek v sedmi zemích a šesti výzkumných a vývojových střediscích na třech kontinentech. [1]

Společnost nabízí inovativní řešení původním výrobcům zařízení i koncovým uživatelům náhradních dílů, přičemž se soustředí na klíčové trhy v automobilovém, zemědělském, stavebním, těžkém průmyslu a na trhu obráběcích nástrojů, elektrických motorů a všeobecného strojního zařízení. Technologická a výrobní způsobilost společnosti Koyo sahá od extrémně velkých ložisek s vnějším průměrem sedm metrů až po miniaturní ložiska s vnitřními průměry o velikosti jeden milimetr. [1]

Výrobní program závodu v Olomouci je zaměřen na výrobu jehličkových, válečkových a axiálních ložisek a kladek do dieselových motorů určených nejen pro automobilový, ale i strojírenský průmysl. Produkty této společnosti lze nalézt např. v automobilech značek Volkswagen, Audi, Renault, VOLVO, PSA PEUGEOT CITROËN, SCANIA, Škoda auto nebo Hyundai Motor Manufacturing Czech. Výrobní závod má certifikaci systému managementu ISO/TS 16949 pro automobilový průmysl, certifikaci systému environmentálního managementu ČSN EN ISO 14001 a certifikaci systému managementu bezpečnosti a ochrany zdraví při práci ČSN EN ISO 18001. [1]

Olomoucký výrobní závod se zaměřuje na výrobu ložiskových kroužků a montáž ložisek. Výroba kroužků prochází těmito výrobními kroky: soustružení, dokončovací operace za měkka, kalení, broušení, honování a montáž. [1]

U všech vyráběných typů ložisek probíhá obdobný výrobní proces. Jako vstupní materiál pro výrobu jsou trubky z chromové oceli pro valivá ložiska 100Cr6 (ČSN 14 4109), ze kterých jsou vysoustruženy základní díly ložisek, vnitřní a vnější kroužky a VT kladky. Tyto základní díly jsou dále tepelně upravovány kalením do solné lázně. V případě použití klasického kalení do oleje by docházelo k větším tvarovým deformacím výrobků, což by mělo negativní vliv na kruhovitost a další důležité parametry produktu. Následnou technologickou

operací je broušení s přesností na tisícinu milimetru, dále pak soustružení, kompletace z hotových součástí na hotové výrobky, konzervace, balení a expedice. Pro zajištění požadované kvality jsou využívány služby servisních oddělení a systém kontroly celého procesu včetně metrologické laboratoře. [1]



Obr. 2.1., Ukázka produktů společnosti Koyo Bearings Česká republika s.r.o.“ [1]

3 Přehled současného stavu měření úchylky kruhovitosti

Ve výrobním procesu má na geometrickou strukturu povrchu vliv celá řada působících faktorů. Tato geometrická struktura je soustavou geometrických prvků povrchu, podmíněnou tvary a rozměry. Mají na ni vliv také vlastnosti, jako jsou: tvar a jeho úchylky, nerovnosti a jejich rozmístění, trhliny a jiné místní poškození povrchu. Měření skutečného povrchu umožňuje zobrazit jeho obraz pouze v jisté míře přiblížení. Tento přibližný obraz skutečného povrchu nazýváme změřeným povrchem [11]. Při porovnávání změřeného povrchu s geometrickým povrchem navrhovaného prvku se vyskytují úchylky tvarů a nerovností povrchu - vlnitost a drsnost.

Úchylka tvaru je míra vychýlení reálného profilu součásti od jeho skutečného tvaru. Je to soubor periodicky opakujících se nerovností s tou charakteristikou, že poměr vzdáleností mezi nepravidelnostmi a jejich hloubkou je větší jako tisíc (*Vzor. 3.1*). [5]

$$\frac{\text{Vzdálenost mezi nepravidelnostmi}}{\text{Hloubka nepravidelnosti}} > 1000$$

(*Vzor. 3.1*)

3.1 Geometrické tolerance

V situacích, kdy se uvažuje pouze jeden tvarový prvek, tak se jeho úchylka od ideálního geometrického tvaru nazývá podle mezinárodní normy *úchylka tvaru*. Tato úchylka od ideálního geometrického tvaru je definována a popsána v normě ČSN EN ISO 1101 - Geometrické specifikace a verifikace výrobků.

„Úchylka geometrického tvaru je míra vychýlení reálného profilu součásti od jeho skutečného tvaru.“ [5]

Geometrické úchylky se vůči základně rozlišují na:





- úchylky směru,
- úchylky polohy,
- úchylky házení.

Geometrická tolerance stanovuje hranici, která nesmí být překročena žádnou z geometrických úchylek.

Geometrické tolerance			
Osamělé prvky	Sdružené prvky		
Tvar	Směr	Poloha	Házení
přímost	rovnoběžnost	poloha	kruhové
rovinnost	kolmost	soustřednost	úplné
kruhovitost	sklon	souosost	
válcovitost	tvar profilu	souměrnost	
tvar profilu	tvar plochy	tvar profilu	
tvar plochy		tvar plochy	

Tab. 3.1 Klasifikace geometrických tolerancí [10]

Popisování geometrických tolerancí se provádí užitím definovaných značek viz. (Tab. 3.2). Tyto značky jsou uvedeny v mezinárodní normě ČSN EN ISO 1101 a zároveň odpovídají klasifikaci geometrických tolerancí, viz. (Tab. 3.1).

Značka *	Definice *
	Kruhovitost Toleranční pole je omezeno v dané rovině průřezy dvěma soustřednými kružnicemi vzdálenými od sebe o šířku mezikružní rovnou tolerancí kruhovitosti.
	Válcovitost Toleranční prostor je omezen dvěma souosými válci vzdálenými od sebe o hodnotu tolerance válcovitosti.
	Rovinnost Toleranční prostor je omezen dvěma rovnoběžnými rovinami vzdálenými od sebe o hodnotu tolerance rovinnosti.
	Tvar čáry Toleranční pole tvaru čáry je omezeno v rovině dvěma čarami ekvidistantními ke jmenovitému tvaru čáry.
	Tvar polohy Toleranční pole tvaru plochy je omezeno v prostoru dvěma plochami ekvidistantními ke jmenovitému tvaru plochy.
	Kolmost (rovina-osa) Toleranční prostor je omezen dvěma rovnoběžnými rovinami vzdálenými od sebe o hodnotu tolerance kolmosti a kolmými k základní vztažné ose.
	Kolmost (osa-osa) Toleranční prostor je omezen válcem, jehož průměr se rovná toleranci kolmosti k základní vztažné ose.
	Rovnoběžnost (rovina-rovina) Toleranční prostor je omezen dvěma rovnoběžnými rovinami vzdálenými od sebe o hodnotu tolerance rovnoběžnosti a rovnoběžnými se základní rovinou.
	Rovnoběžnost (rovina-rovina) Toleranční prostor je omezen dvěma rovnoběžnými rovinami vzdálenými od sebe o hodnotu tolerance rovnoběžnosti a rovnoběžnými se základní rovinou.
	Sklon roviny Toleranční prostor je omezen dvěma rovnoběžnými rovinami vzdálenými od sebe o hodnotu tolerance sklonu a svírající se základní rovinou nebo se základní přímkou jmenovitý úhel.
	Poloha bodu Je-li hodnota tolerance předznamenána značkou průměru, je toleranční prostor omezen kružnicí o průměru rovném toleranci umístění.
	Souosost Je-li hodnota tolerance předznamenána značkou průměru, je toleranční prostor omezen válcem o průměru rovném toleranci souososti a jeho osa se shoduje se základní osou.
	Obvodové házení Toleranční pole v kterékoliv rovině kolmé k ose je omezeno dvěma soustřednými kružnicemi vzdálenými od sebe o hodnotu tolerance házení v kterékoliv radiální poloze na válci, jehož osa je totožná se základní osou.
*Ve smyslu ČSN EN ISO 1101: 2007	

Tab. 3.2 Značky pro geometrické tolerance [13]

Mezinárodní norma ČSN EN ISO 1101 uvádí pojmy a definice, které souvisí s geometrickými tolerancemi a geometrickými úchylkami. Norma definuje geometrické tolerance jako pásma, tzv. toleranční pole, v nichž musí ležet příslušný skutečný prvek. Pole může mít tvar kružnice, válce, plochy mezi dvěma rovnoběžnými plochami nebo dvěma sousými válci atd. U většiny případů jsou úchylky způsobeny výrobním procesem a lze je identifikovat měřením.

3.2 Normy týkající se hodnocení úchylky kruhovitosti

Norma ČSN P ISO/TS 12181: 2005 (01 4151)

Název normy: Geometrické požadavky na výrobky (GPS) – Kruhovitost.

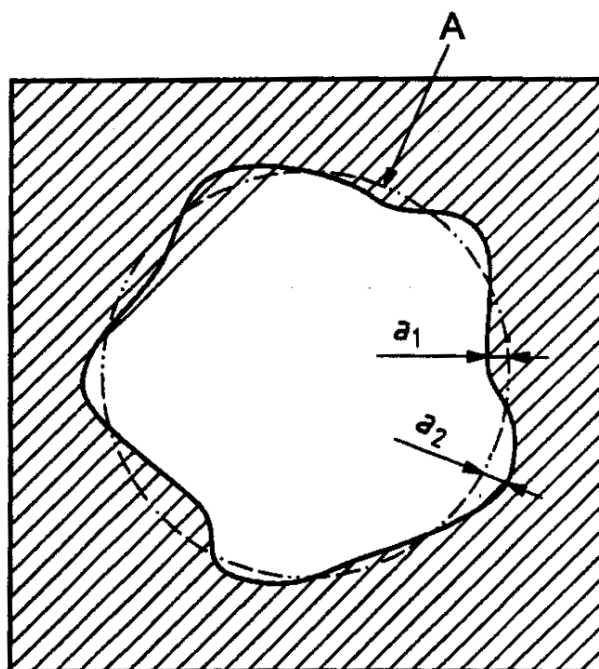
Tato předběžná česká technická norma je českou verzí technické specifikace ISO/TS 12181:2003. Technická specifikace ISO/TS 12181:2003 má status předběžné české technické normy. [20]

Základní pojmy:

- „kruhovitost (roundness) – vlastnost kružnice,
- osa kruhovitosti (roundness axis) – osa prvku přiřazeného k integrálnímu prvku,
- rovina kruhovitosti (roundness plane) – rovina kolmá k ose otáčení v celém rozsahu prvku.“ [20]

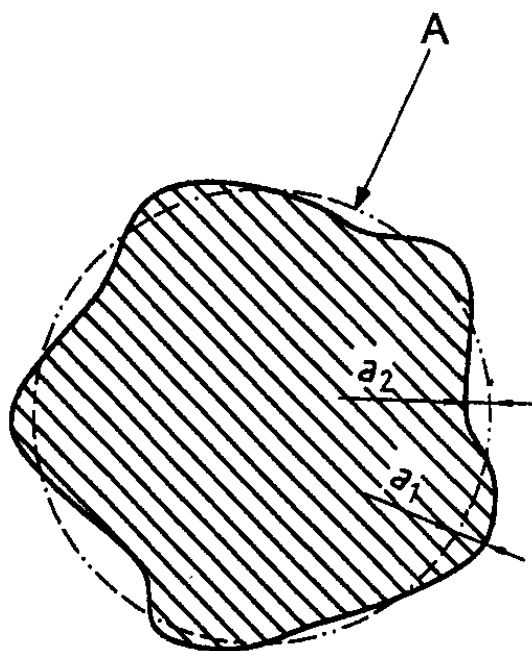
Pojmy týkající se profilu:

- „*skutečný povrch součásti* (real surface of workpiece) – integrální prvek jako část skutečného povrchu součásti omezený přilehlými skutečnými (integrálními) prvky [ISO 14660-1:1999, definice 2.4],
- *zjištěná obvodová čára* (extracted circumferential line) – (kruhovitost) digitální reprezentace průsečnice skutečného povrchu a roviny kruhovitosti,
- *profil kruhovitosti* (roundness profile) – zjištěná obvodová čára úmyslně modifikovaná filtrem,
- *místní úchylka kruhovitosti LRD* (local roundness deviation) – minimální vzdálenost od bodu profilu k referenční kružnici, viz. (obr. 3.1) a (obr. 3.2).“ [20]



Obr. 3.1 „Místní úchylka tvaru vnitřního kruhového prvku“

A – referenční kružnice, a_1 – kladná místní úchylka, a_2 – záporná místní úchylka [20].



Obr. 3.2 „Místní úchylka tvaru vnějšího kruhového prvku“

A – referenční kružnice, a_1 – kladná místní úchylka, a_2 – záporná místní úchylka [20].

Pojmy týkající se referenční kružnice:

- „*referenční kružnice* (reference circle) – přiřazená kružnice umístěná k profilu kruhovitosti podle specifických konvencí, k níž se vztahují úchyly kruhovitosti a parametry kruhovitosti,
- *referenční kružnice nejmenší zóny MZCI* (minimum zone reference circle) – dvě soustředné kružnice vymezující kruhový profil a umístěné v nejmenší kolmé vzdálenosti (od sebe),
- *vnější referenční kružnice nejmenší zóny* (outer minimum zone reference circle) – vnější kružnice nejmenší zóny referenčních kružnic,
- *vnitřní referenční kružnice nejmenší zóny* (inner minimum zone reference circle) – vnitřní kružnice nejmenší zóny referenčních kružnic,
- *střední referenční kružnice nejmenší zóny* (mean minimum zone reference circle) – aritmetická střední kružnice nejmenší zóny referenčních kružnic,
- *referenční kružnice nejmenších čtverců LSCI* (least squares reference circle) kružnice pro niž je součet čtverců místních úchylek kruhovitosti nejmenší,
- *nejmenší opsaná referenční kružnice MCCI* (minimum circumscribed reference circle) – nejmenší možná kružnice, která může být umístěna vně profilu kruhovitosti,
- *největší vepsaná kružnice MICI* (maximum inscribed reference circle) – největší možná kružnice, která může být umístěna uvnitř profilu kruhovitosti.“ [20]

Pojmy týkající se obvodu kružnice:

- „*vlny za otáčku UPR* (undulations per revolution) – počet sinusových vln obsažených na profilu kruhovitosti,
- *obvodová vlnová délka* (circumferential wavfelenght) – obvod referenční kružnice rozdělený podle UPR.“ [20]

Pojmy týkající se funkce filtrů:

- *vlnový filtr* (wave filter) – filtr operující na otevřeném profilu, který přenáší určitý rozsah sinusových vln, pro něž je stanoven poměr amplitudy vstupu k výstupu, při současném tlumení poměru vln ležící mimo tento rozsah na obou koncích,
- *přenosová charakteristika filtru* (transmission characteristic of a filter) – přenosová funkce udává stupeň, se kterým je amplituda sinusového profilu, jako funkce vlnové délky, tlumena,

- *mezni vlna cut-off* (undulation cut-off) – mezní vlnová délka cut-off, vztažena ke zjištěné obvodové čáře,
- *pásmo přenosu pro profily kruhovitosti* (transmission band for roundness profiles) – pásmo sinusových vln profilu, které jsou přenášeny větším než specifikovaným procentem filtru, stanovené hodnotami delší a kratší mezní vlny cut-off.“ [20]

Parametry hodnocení úchylky kruhovitosti:

- „*úchylka kruhovitosti od výstupku k prohlubni* (MZCI), (LSCI), (MCCI), (MCCI) RONt (peak-to-valley roundness deviation) – hodnota největší kladné místní úchylky kruhovitosti přidaná k absolutní hodnotě největší záporné místní úchylky kruhovitosti,
- *úchylka kruhovitosti od výstupku k referenční kružnici* (LSCI) RONp (peak-to-reference roundness deviation) – hodnota největší kladné místní úchylky kruhovitosti od referenční kružnice nejmenších čtverců,
- *úchylka kruhovitosti od referenční kružnice k prohlubni* (LSCI) RONv (reference circle-to-valley roundness deviation) – absolutní hodnota největší záporné místní úchylky kruhovitosti od referenční kružnice nejmenších čtverců,
- *střední kvadratická úchylka kruhovitosti* (LSPL) RONq (root mean square roundness deviation) – druhá odmocnina součtu čtverců místních úchylek kruhovitosti od referenční kružnice nejmenších čtverců.“ [20]

$$RONq = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi} \int_0^{2 \cdot \pi} LRD^2 d\theta} \quad (Vzor. 3.2) [20]$$

LRD – místní úchylka kruhovitosti, θ – okamžitý úhel profilu kruhovitosti

Norma ČSN ISO 4291 (01 4411)

Název normy: Metody hodnocení úchylek kruhovitosti – Měření změn poloměru.

„Tato mezinárodní norma uvádí metody stanovení úchylek kruhovitosti měřením změn poloměru s použitím dotykových přístrojů (snímačů).“ [21]

Norma obsahuje:

- a) „typy přístrojů a základní předpisy,
- b) doporučení pro použití přístrojů,
- c) metody kalibrace přístrojů a ověřování jejich vlastností.“ [21]

„Tato mezinárodní norma slouží k hodnocení úchylek kruhovitosti součástí od ideálního tvaru prostřednictvím transformovaného profilu získaného za vymezených podmínek, vyjádřených vzhledem k jednomu z následujících středů:

- a) střed kružnice nejmenších čtverců,
- b) střed kružnice nejmenšího pásma (mezikruží),
- c) střed nejmenší opsané kružnice,
- d) střed největší vepsané kružnice.“ [21]

Norma ČSN ISO 4292 (01 4412)

Název normy: Metody hodnocení úchylek kruhovitosti – Měření dvou a třibodovou metodou.

„Tato mezinárodní norma vymezuje metody číslcového hodnocení úchylky kruhovitosti kombinací dvou a třibodového měření:

- a) určování dvoubodovým měřením (měření průměrů),
- b) určování třibodovým měřením shora (symetrické nebo asymetrické uspořádání),
- e) určování třibodovým měřením zdola (symetrické uspořádání).“ [22]

Dále jsou v normě obsaženy odkazy na související normy, definice a termíny vztahující se k dané problematice, způsoby měření a uspořádání, podmínky měření, hodnocení chyb měření a měřicí přístroje.

3.3 Úchylky geometrického tvaru

Úchylky geometrického tvaru jsou způsobeny nepřesností výrobního procesu, a proto musí být měřeny a kontrolovány. Úchylky geometrického tvaru jsou hodnoty vychýlení skutečného profilu součásti od jeho jmenovitého profilu. Tato úchylka se stanovuje jako minimální z maximálních vzdáleností hodnoceného prvku od obalového prvku. Pro hodnocení

tvárové přesnosti je normou stanoveno kritérium obalových prvků (kritérium obalových čar na profilu nebo ploch na tělese).

„Obalový prvek definujeme jako čáru nebo plochu:

- mající jmenovitý tvar,
- dotýkající se hodnoceného prvku (profilu nebo plochy),
- dotýkající se hodnoceného prvku vně materiálu.“ [3]

V praxi jsou zavedeny tyto úchytky tvaru:

- Na rotačních plochách:
 - úchylka kruhovitosti (na profilu),
 - úchylka válcovitosti (na ploše).
- Na rovinných plochách:
 - úchylka přímosti (na profilu),
 - úchylka rovinnosti (na ploše).

Všeobecně vznikají úchytky od ideálního geometrického tvaru vlivem použitého obráběcího stroje, obrobku, nástroje a prostředí. [6]

Obráběcí stroj má největší vliv na úchytky geometrického tvaru a převážně je to ovlivněno těmito faktory:

- osa obrobku (osa rotace) a nerovnoběžné vodící plochy obráběcího stroje,
- osa obrobku je vychýlena vzhledem k vodícím plochám stroje, anebo jsou vychýlené vodící plochy stroje,
- chvění stroje,
- pružné deformace stroje. [6]

Obrobek je prvek, který ovlivňuje úchylku tvaru jen zčásti, a to:

- uvolněním zbytkových napětí,
- smrštění po obrábění,
- nehomogenitou materiálu,
- tepelným ovlivněním,
- stárnutím. [6]

Nástroj má převládající vliv na drsnost obrobených ploch prostřednictvím:

- opotřebení,
- geometrie (poloměr hrotu),
- posuvu. [6]

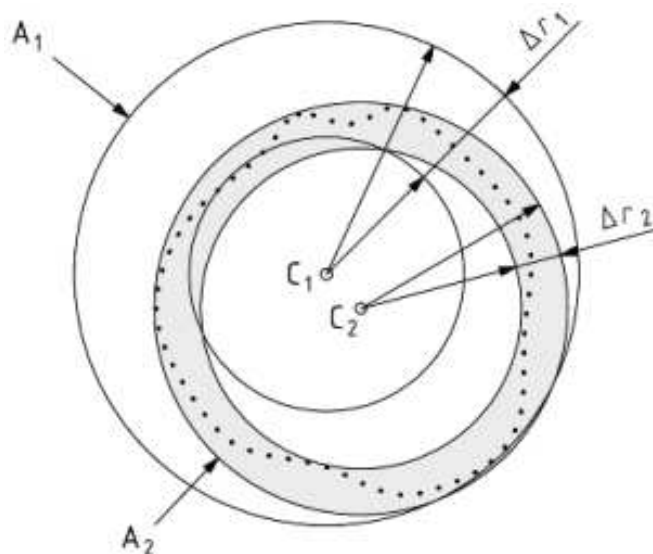
Prostředí také může ovlivňovat úchyly od ideálního geometrického tvaru:

- chvěním, přenášeným z obráběcích strojů stojící v blízkosti,
- chvěním, přenášeným z blízké dopravy, hlavně těžkých nákladních automobilů,
- lokální a časovou změnou okolní teploty. [6]

Všechny tyto zdroje nepřesností způsobují úchyly obrobků od jejich ideálních geometrických tvarů.

3.4 Úchylka kruhovitosti

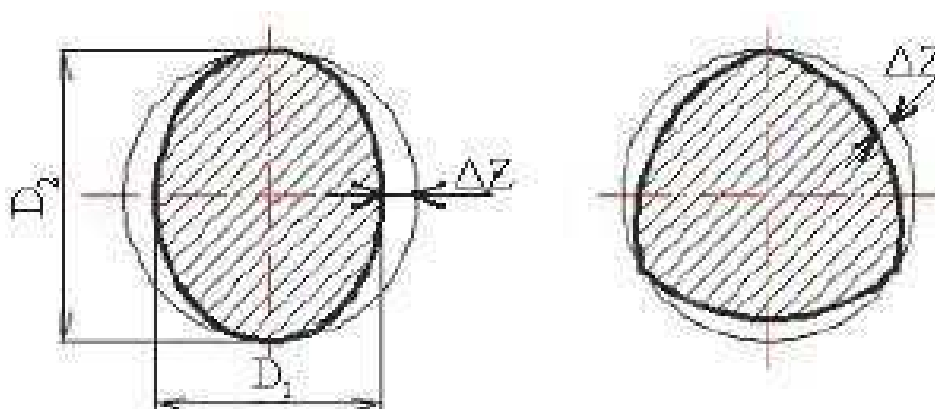
Úchylnou kruhovitosti je maximální radiální vzdálenost nejmenší opsané, nebo největší vepsané kružnice daného profilu po vrcholky drsnosti. Tolerovaný prvek je považován za správný tehdy, když tato radiální vzdálenost je rovna předepsané hodnotě tolerance nebo je menší. Umístění středů a poloměrů kružnic musí být zvolena tak, aby radiální vzdálenost mezi dvěma soustřednými kružnicemi byla co nejmenší [2] [23], příklad viz. (obr. 3.3).



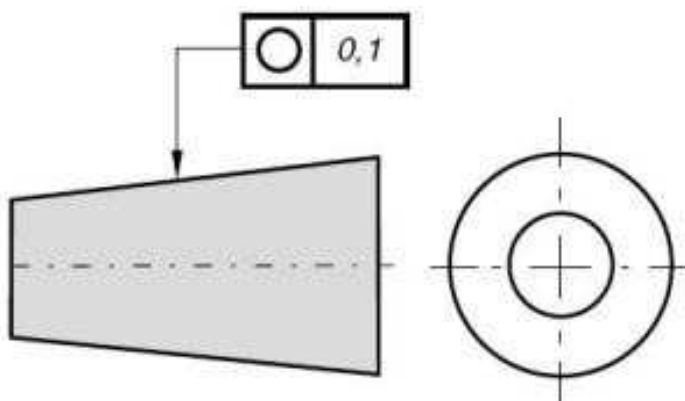
Obr. 3.3 „Hodnocení minimální zóny pro kružnice“ [23]

Z obrázku vyplývá správná toleranční podmínka $\Delta r_2 < \Delta r_1$. Správná toleranční podmínka dvou soustředných kružnic – A_2 . Radiální vzdálenost Δr_2 je buď rovna, nebo je menší předepsané toleranci kruhovitosti.

Skutečné tvary rotačních ploch se zjednodušeně vyskytují ve dvou tvarech. A to bližším k elipse, kdy hovoříme o oválnosti, anebo s určitým počtem hran po obvodě a tehdy hovoříme o hranatosti (obr. 3.4). [2]



Obr. 3.4 „Tvary rotačních ploch (vlevo oválnost, vpravo hranatost)“ [11]

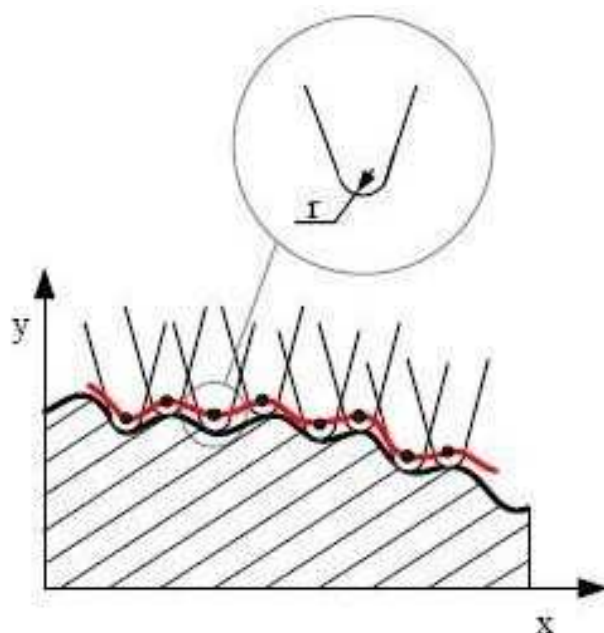


Obr. 3.5 „Příklad tolerančního pole kruhovitosti a jeho značení“ [11]

Parametry hodnocení úchylky kruhovitosti

Úchylky kruhovitosti jsou měřené v rovinách kolmých na osu kontrolované rotační plochy. Normou je stanovený nejmenší počet měření a poloha rovin měření v závislosti na délce válcové plochy a poměru délky a průměru. [3]

Funkční plochy rotačního tvaru jsou významné z hlediska jejich čtenosti a hlavně z hlediska požadavků na geometrickou jakost. Geometrická jakost v tomto případě zahrnuje také kruhovitost a složky struktury povrchu – vlnitost povrchu a drsnost povrchu. Vlnitost povrchu se do kruhovitosti buď zahrnuje, nebo je filtrací eliminována. Drsnost povrchu není po obvodu zjišťována (obr. 3.6). Přesnost metody je závislá na tvaru dotyku na snímaném profilu, který vykresluje dráhu snímacího dotyku. [3]



Obr. 3.6 „Příklad snímaného profilu na konvenčním přístroji spojitou metodou“ [11]

Pro hodnocení kruhovitosti je všeobecně potřebné získat profil rotační součásti v rovině kolmé na jeho osu (skutečný profil) a tento profil porovnat s kružnicí (ideální profil), jejíž polohu vůči posuzovanému profilu je potřebné určit podle daných pravidel. Radiální velikost rozdílu obou profilů je prezentována jako úchylka kruhovitosti.

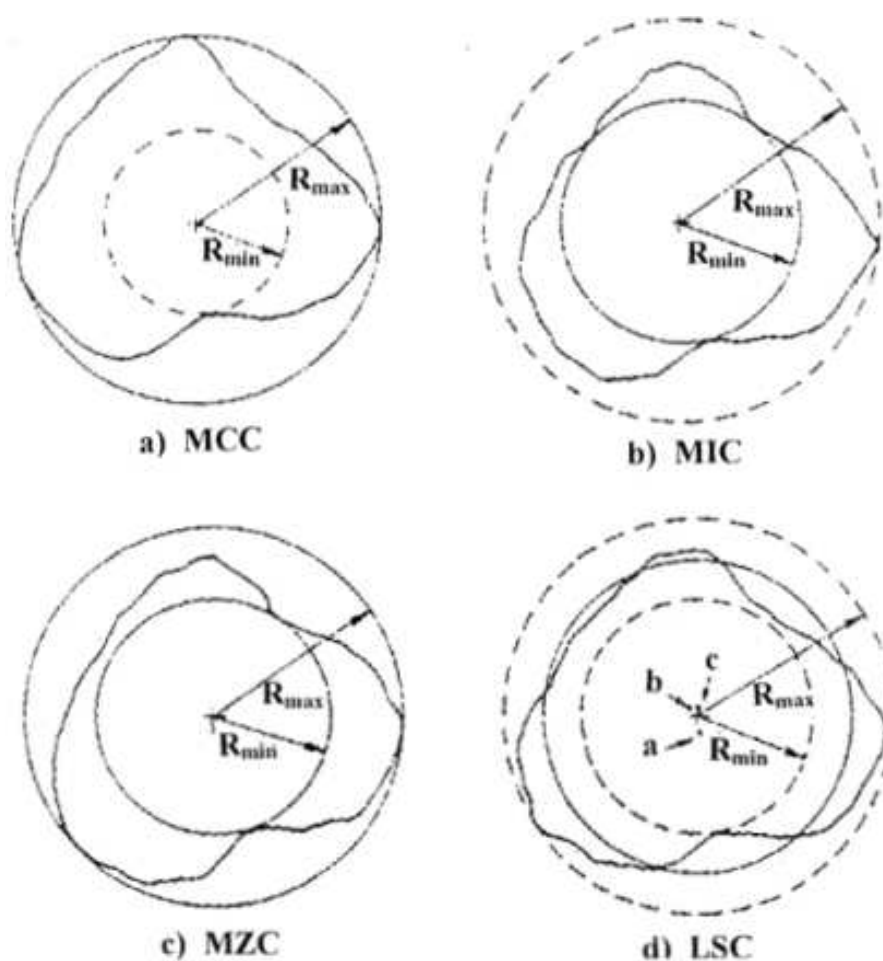
Možnost náhradních prvků – kružnic zaznamenaných ze zkoumaného profilu součásti, soustředného s osou rotace nebo jeho zobrazení. [24]

Nejmenší opsaná kružnice (MCCI) – nejmenší kružnice, kterou je možno nakreslit okolo zaznamenaného nebo upraveného profilu součásti (obr. 3.7a). Značí se ΔZ_c .

Největší vepsaná kružnice (MICI) – největší kružnice, kterou je možno nakreslit do zaznamenaného nebo upraveného profilu otvoru (obr. 3.7b). Značí se ΔZ_i .

Nejmenší pásmo – mezikruží (MZCI) – dvě soustředné kružnice, které obklopují zaznamenaný nebo upravený profil a mají nejmenší radiální vzdálenost (obr. 3.7c). Značí se ΔZ_z .

Střední kružnice nejmenších čtverců (LSCI) – kružnice, u které je součet čtverců úchylek od zaznamenaného profilu nebo upraveného profilu nejmenší (obr. 3.7d). Značí se ΔZ_q .



Obr. 3.7 „Referenční kružnice pro hodnocení kruhovitosti“ [3]

Při měření kruhovitosti je potřeba operovat s profilem, který je z měřeného objektu získán souvislým zaznamenáváním okamžitých poloh jednotlivých bodů obvodu. Standardní podmínky měření a hodnocení kruhovitosti je nutné zabezpečovat pomocí příslušných technických předpisů.

Pro získání číselných hodnot úchylek kruhovitosti je nutné udělat řadu kroků, ze kterých každý určitým způsobem ovlivní jejich přesnost.

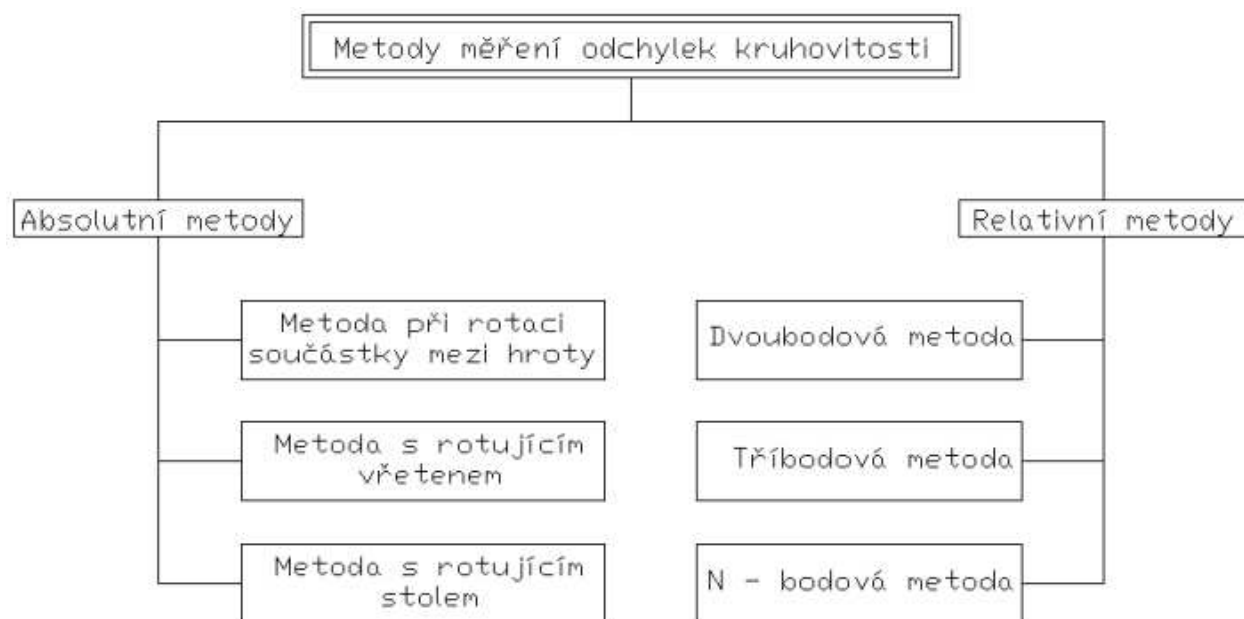
Základní kroky:

- *stanovení kritérií* pro hodnocení kruhovitosti,
- *získání informací* z povrchu měřeného rotačního objektu, které je možno provést spojitým nebo diskrétním způsobem snímání. Při diskrétním způsobu snímání lze využít dvoubodovou nebo tříbodovou metodu, nebo odměřování souřadnic omezeného počtu bodů z obvodu na souřadnicovém měřicím stroji. Oba způsoby však patří mezi metody zjednodušené,
- *zpracování signálu* nesoucího informace,
vyhodnocení a interpretace výsledků měření. [3]

3.5 Metody měření úchylky kruhovitosti

Úchylka kruhovitosti má ve výrobě valivých ložisek, ale i např. u nosných a vodících prvků hřídelí mimořádný význam. Kontrola přesnosti tvaru – kruhovitosti, je z hlediska funkce mimořádně důležitá. Společně s drsností povrchu významně ovlivňuje úroveň vibrací rotujících částí a tím i kvalitu celého zařízení. Z tohoto důvodu je věnována vysoká pozornost hodnocení a zdokonalování metod měření a vyhodnocení úchylky kruhovitosti a používané měřicí techniky. Vlastní měření a vyhodnocení neslouží pouze k určení velikosti úchylky, ale také umožňuje získat informace využitelné v procesu tvorby povrchu – obrábění s cílem upravovat a zlepšovat technologické postupy. [11] [24]

Na měření úchylek kruhovitosti se používají různé měřicí metody a různé měřicí přístroje a zařízení, od univerzálních až po velmi přesné měřicí přístroje (obr. 3.8). V posledních letech výrazně vzrostl vývoj třísouřadnicových měřicích strojů. Zároveň umožňují měření kruhovitosti, ale nezaručují malou nejistotu měření, jako speciální zařízení. Výhodou souřadnicových měřicích strojů je jejich univerzálnost, jako např. hodnocení úchylky tvaru, průměru a polohy kružnic.



Obr. 3.8 Rozdělení metod měření odchylek kruhovitosti [11]

Měřicí metody měření odchylek kruhovitosti pro různé měřicí přístroje jsou děleny na:

- spojitě metody,
- nespojitě metody (diskrétní metody).

3.5.1 Spojité metody

Spojitě metody jsou takové metody, při kterých je dotykový snímač měřicího zařízení v neustálém kontaktu s měřenou součástí po celou dobu měření. Tyto metody se rozdělují na metody absolutní, relativní a skenovací.

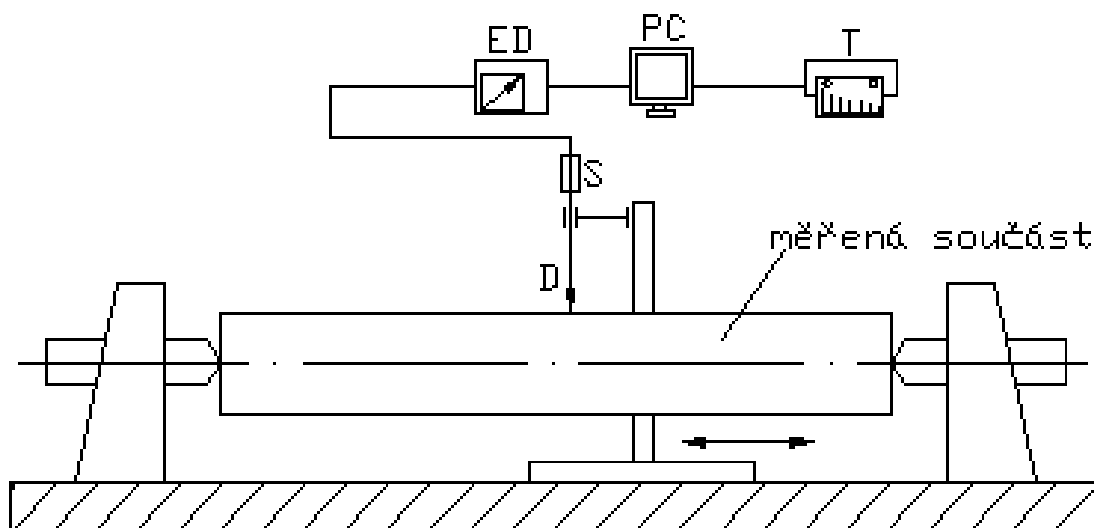
Absolutní metody – metody měření změny poloměru

Absolutní metody jsou nazývány také metodami měření změn poloměru s použitím dotykových přístrojů. Absolutní metody měření se dělí podle použití měřicího přístroje, viz. (obr. 3.8):

- metoda při rotaci součásti mezi hroty (obr. 3.9),
- metoda s rotujícím vřetenem – měřená součást stojí a snímač rotuje (obr. 3.10),
- metoda s rotujícím stolem – snímač stojí a součást rotuje (obr. 3.10).

Všechny tyto metody mají vysokou přesnost měření.

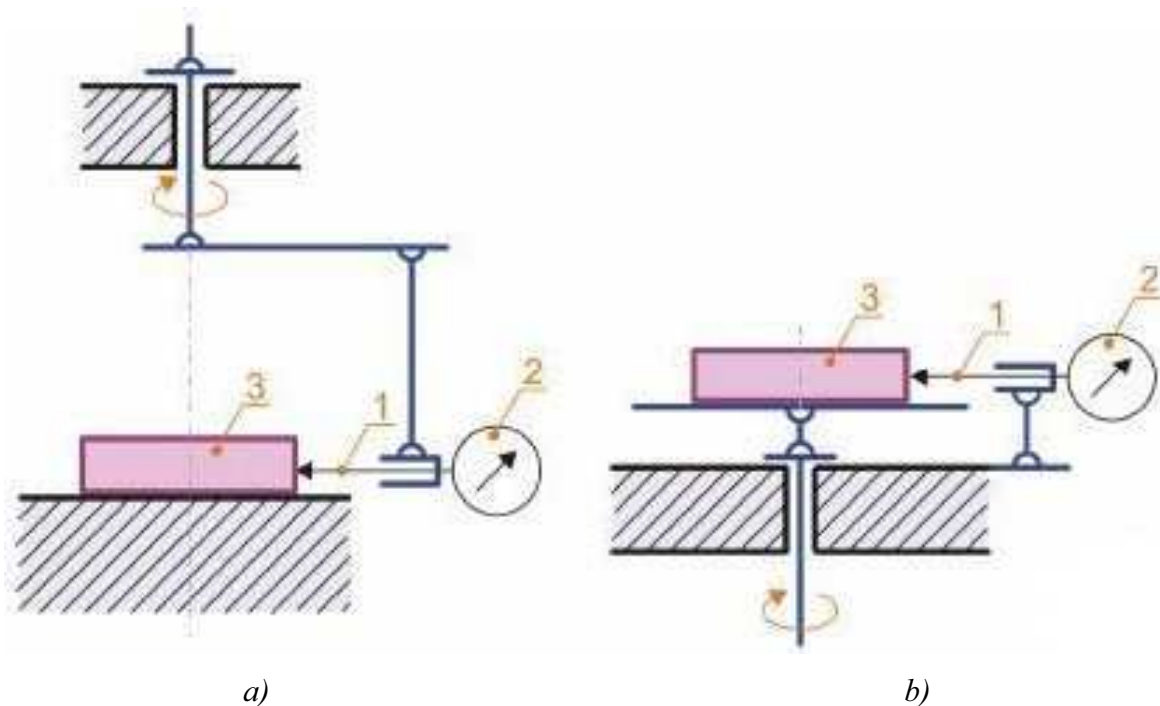
Metoda při rotaci součásti mezi hroty (obr. 3.9) – nejjednodušší absolutní metoda.
Měření je realizováno pomocí měřicího přístroje s dotykem umístěným v radiálním směru.



Obr. 3.9 Schéma měření při rotaci mezi hroty

D – dotyk, S – snímač, ED – elektronický délkoměr, PC – počítač, T – tiskárna

Metody měření s rotujícím vřetenem a rotujícím stolem (obr. 3.10) – Povrch měřené součásti je snímán spojitě. Před začátkem měřením je nutné dokonale vystředit a vycentrovat měřenou součást tak, aby byla osa součásti shodná s osou rotace vřetena nebo stolu a excentricita byla co nejmenší. Poloměrové (radiální) pohyby snímače jsou převáděny na elektrické signály, které jsou následně zpracovávány vhodným softwarem v počítači. Výsledkem měření je buď grafický záznam průběhu profilu kruhovitosti součásti, nebo jeho číselné vyhodnocení. Výhodou této metody je, že snímáný profil odpovídá skutečnému profilu povrchu. Měřicí přístroj je velmi přesný a přesnost otáčení vřetena nebo stolu je často lepší jako 0,1 μm . K tomuto je však velmi důležitá časově náročná příprava, která zahrnuje dokonalé vystředění a vyrovnání součásti. [11]



a)

b)

Obr. 3.10 „Princip měření kruhovitosti“

a) s rotujícím vřetenem, b) s rotačním stolem

1 – měřicí dotyk, 2 – měřicí přístroj, 3 – měřená součást [6]

Požadavky na nastavení měřeného objektu před měřením kruhovitosti jsou směr měření a volba poloměru hrotu dotyku s ohledem na separaci drsnosti povrchu.

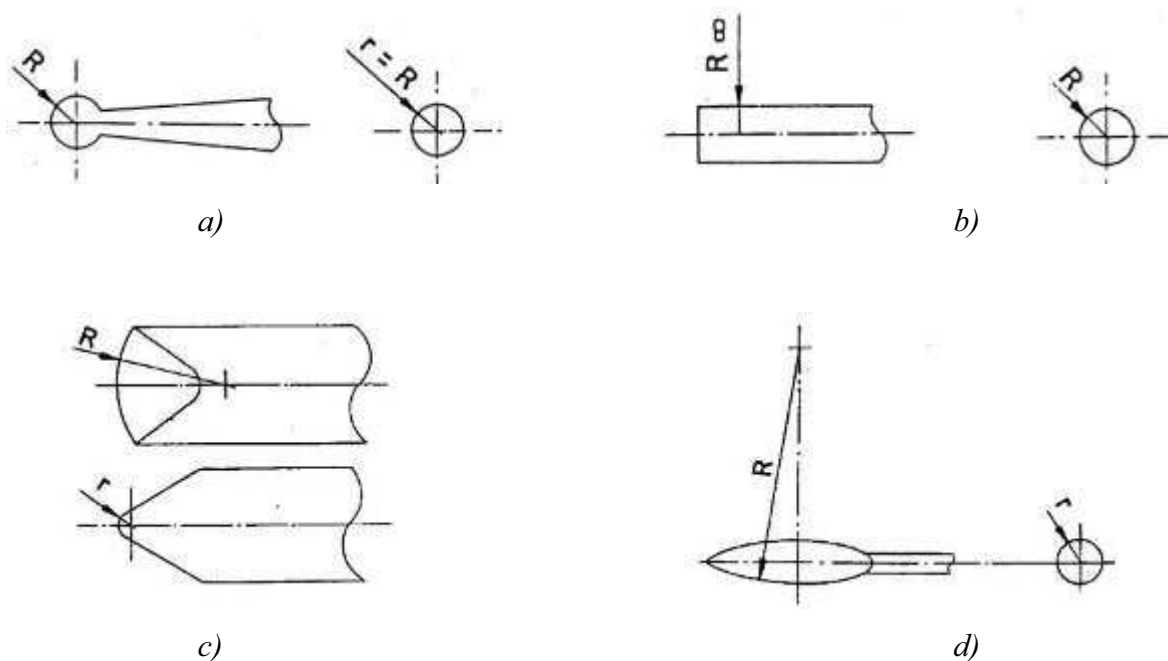
Podle výstupních informací jsou přístroje:

- se zápisem profilu,
- s přímým zobrazením číselných hodnot parametrů,
- s kombinací obou způsobů.

Podle charakteru povrchu měřeného povrchu jsou specifikovány druhy a rozměry hrotů měřicích dotyků a je předepsána statická měřicí síla dotyků.

Volba dotyku ovlivňuje charakteristiku povrchu součástí. V závislosti na druhu a rozsahu nerovnoměrnosti přicházejí v úvahu tyto druhy hrotů (obr. 3.11):

- kulové,
- válcové,
- klínové,
- kapkové. [21]



Obr. 3.11 „Druhy hrotů měřicích dotyků“

a) kulový, b) válcový, c) klínový, d) kapkový [21]

Specifikované chyby přístroje jsou:

- celková chyba přístroje,
- chyba otáčení – radiální,
- axiální.

Měřicí přístroje přizpůsobené absolutním metodám zaručují velkou přesnost měření. Jsou však používány především v laboratorních podmínkách, protože vyžadují dodržení speciálních podmínek, jako např. přesné středění a centrování měřených předmětů, což souvisí s vykonáváním časově náročných činností. Z tohoto důvodu absolutní metody nebývají využívány pro rychlé a hromadné hodnocení úchylek kruhovitosti. Pro takovéto hodnocení jsou vhodnější relativní metody. [11]

Relativní metody

Uplatnění relativních metod měření je především v ložiskovém průmyslu. Jejich výhodou je všeobecná dostupnost a možnost využití ve výpočtové technice. Relativní metody můžeme rozdělit dle (obr. 3.12), a to na metody dvoubodové, třibodové a n-bodové.



Obr. 3.12 Rozdělení relativních metod měření úchylek kruhovitosti [11]

V měřicím přístroji se ustaví zkoumaný prvek do měřicí hlavy a následně se uvede do otáčivého pohybu, rychlostí $200 - 500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$. Kmity způsobené úchyly kruhovitosti jsou přenášeny elektrodynamickým snímačem, procházejí elektronickým obvodem a zaznamenávají střední hodnotu měřených úchylek na obrazovce osciloskopu. Předností těchto přístrojů je rychlost měření, což je vhodné i pro hromadnou kontrolu hotových prvků. [11]

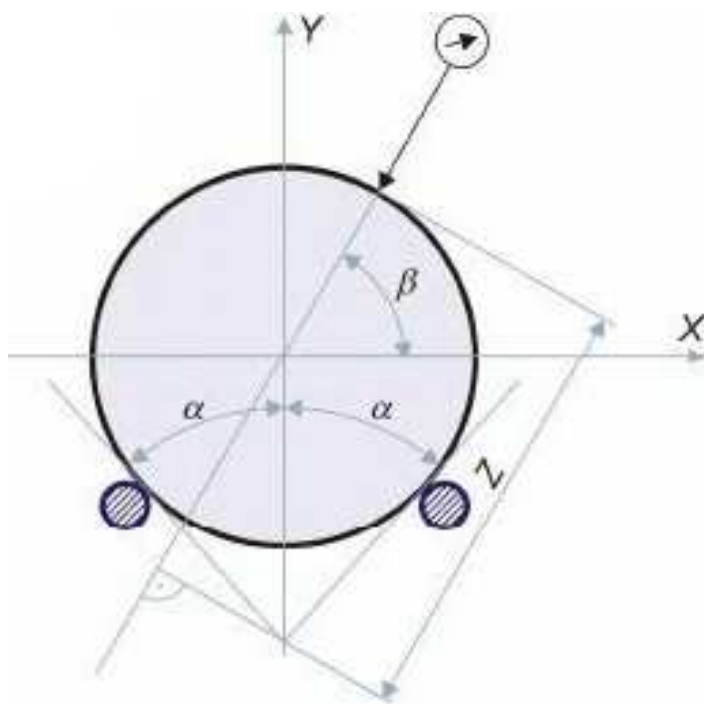
Při relativních způsobech měření úchylek kruhovitosti se rozlišují body:

- podpěry (opírání se na prizmu),
- body snímání.

Polohu těchto bodů vzhledem ke stanovené souřadnicové soustavě určují parametry metody – úhel α a β (obr. 3.13).

Úhel 2α – úhel mezi tvořícími čarami opěrných bodů, které jsou tečnami kružnic. Tyto body reprezentují pravý měřený profil v místech jejich styku s těmito body.

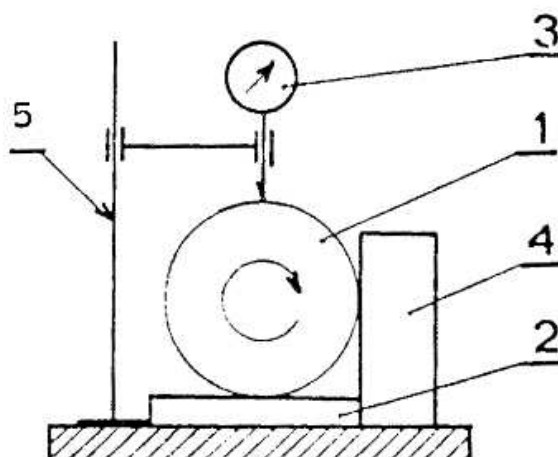
Úhel β – úhel mezi směrem měření (směrem pohybu snímacího dotyku) a souřadnicovou osou X [11].



Obr. 3.13 „Princip měření úchylky kruhovitosti relativními metodami“ [6]

Z hlediska konstrukce je použití relativních metod do zařízení jednoduché, a je tedy možné je zavádět do výrobních podmínek a instalovat je přímo na obráběcí stroje.

Dvoubodová metoda – lze ji realizovat tradiční metodou (úhel $2\alpha = \pi$, $\beta = \pi$) nebo klasickou metodou s boční podpěrou (úhel $\alpha = \beta$). Princip měření spočívá v ustavení měřené součásti na měřicí desku a rozdíly průměrů jsou odčítány ze snímače (obr. 3.14).



Obr. 3.14 „Měření úchylky kruhovitosti dvoubodovou metodou – přímou“ [3]

1– měřená součást, 2– podložka, 3– indikační přístroj, 4– boční doraz, 5– měřicí stojan

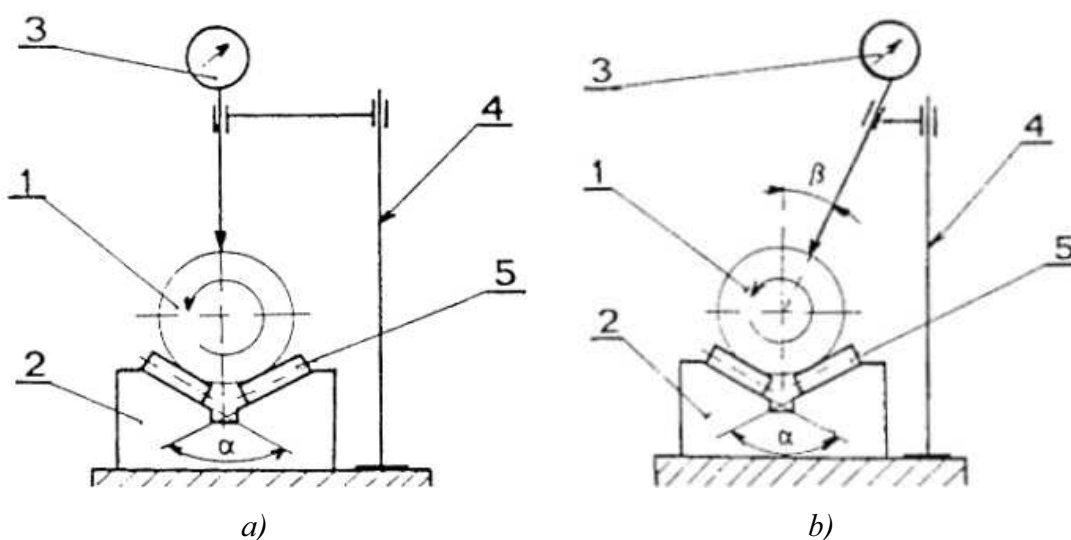
Je to jednoduchá metoda, všeobecně využívaná v průmyslových podmínkách. Umožňuje měření s využitím univerzálních měřicích přístrojů. [11]

Tříbodová metoda – měření se uskutečňuje měřením v prizmě o úhlu 2α v rozmezí od $0^\circ \div 180^\circ$. Z praktického hlediska musí být závěrací úhel v rozmezí $36^\circ \div 140^\circ$ [4].

Tříbodové metody se rozdělují na symetrické a nesymetrické.

- *Symetrické metody* (úhel $\beta = 90^\circ$ – přímá, úhel $\beta = -90^\circ$ – nepřímá) jsou používány pro měření tvaru vnitřních i vnějších rozměrů. Umožňují měření na univerzálních měřicích přístrojích i s využitím tradičních prizem a lze také měřit hodnoty průměru. V mnohých případech však neumožňují měření párných úchylek.
- *Nesymetrické metody* (úhel $0^\circ < \beta < 90^\circ$ – přímá, úhel $-90^\circ < \beta < 0^\circ$ – nepřímá) slučují přednosti dvoubodových a tříbodových symetrických metod, čímž umožňují měření všech případů úchylek kruhovitosti. Problémem nesymetrických metod měření je vhodný výběr takové kombinace úhlů α a β , aby možnosti měření jednotlivých úchylek byly co největší a byla minimalizována nepohodlnost využívání koeficientů zvětšení. [11]

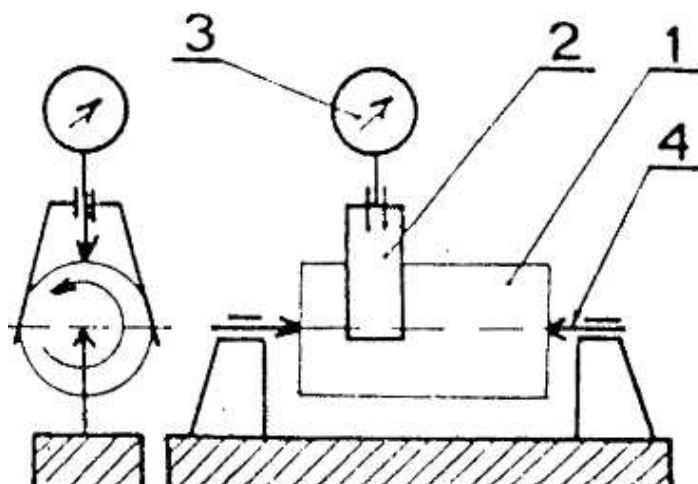
Měření se realizuje pomocí dvou metod – přímá (obr. 3.15) a obrácená (obr. 3.16).



Obr. 3.15 „Měření úchylky kruhovitosti tříbodovou metodou – přímá metoda“

a) systematické uspořádání, b) nesystematické uspořádání

1 – měřená součást, 2 – prizma, 3 – úchylkoměr, 4 – měřicí stojan, 5 – válečky [3]



Obr. 3.16 „Měření úchylky kruhovitosti tříbodovou metodou – obrácená metoda“

1 – měřená součást, 2 – nasazovací přípravek, 3 – úchylkoměr, 4 – hrotový přístroj [3]

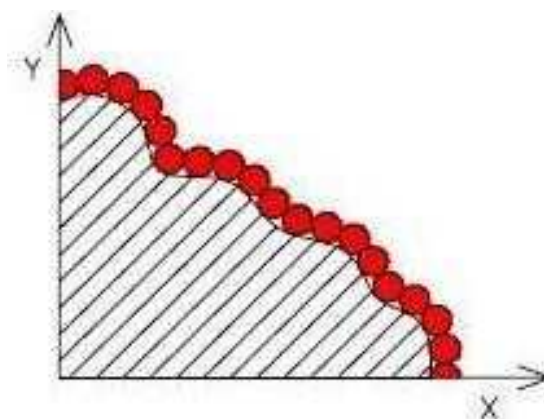
N-bodová metoda – může být uskutečněna dvěma způsoby. A to tradičním ustavením do prizmy s použitím alespoň dvou snímacích dotyků, anebo použitím speciální prizmy, která se uplatňuje především při měření velkých rozměrů.

Skenovací metoda

Skenovací metoda je aplikována na třísouřadnicových měřicích strojích. Při skenovacím způsobu snímání je výsledkem určení hodnot souřadnic měřených bodů jdoucích za sebou na charakterizaci čar měřeného povrchu. [25]

Rozložení skenovacích bodů je se vzájemným rozestupem mezi dvěma za sebou následujícími body skenování často menší než 0,1 mm. Takto vysoká hustota skenovaných bodů zaručuje velmi podrobné informace o měřeném povrchu.

Plynulé měření prvků a kontur poskytne dostatečně vysokou hustotu bodů, potřebnou ke správnému určení tvaru povrchu (obr. 3.17). Měření se uskutečňuje na CMM a měřicí hlava musí podporovat skenovací technologii stálého kontaktu měřicího hrotu a měřeného objektu.



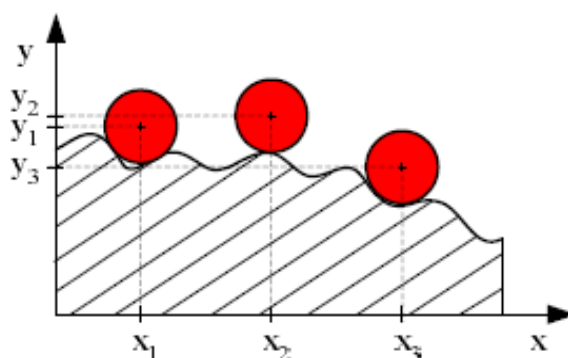
Obr. 3.17 „Snímání bodů skenovací metodou“ [11]

3.5.2 Nespojité (diskrétní) metody

Nespojitým způsobem snímání získáváme informace měřením souřadnic omezeného počtu bodů z měřeného povrchu.

Měření se realizuje na souřadnicovém měřicím stroji v režimu určení polohy nespojitých (diskrétních) bodů. Používají se standardní měřicí hlavy, umožňující pouze snímání jednotlivých bodů. Pomocí několika snímaných bodů dostáváme neúplnou informaci o tvaru, případně o poloze snímané plochy. Při snímání kruhového profilu je definována geometricky třemi body, kdy se při určení tvaru a polohy vychází ze snímání souřadnic čtyř bodů v nespojitém (diskrétním) režimu. Vypočítá se souřadnice středu kružnice a její průměr. Tento vypočítaný tvar a poloha kružnice jsou pouhým výstupem měření.

Výsledky nespojitého měření jsem poměrně nepřesné a neposkytují úplnou informaci o poloze tvaru a rozměru měřeného povrchu. Předpokladem přesného měření je přesné vyrovnaní, protože při vyjmutí a opětovném vložení součásti do přípravku bude poloha součásti odlišná. Také opakování měření se snímáním malého počtu bodů vede k rozdílným výsledkům. Snímáním většího počtu bodů jsou zabezpečeny stejné výsledky, a to i při změně polohy součásti [11].



Obr. 3.18 „Snímání bodů nespojitou metodou“ [10]

3.6 Měřicí zařízení na měření úchylky kruhovitosti

Potřeby metrologické praxe mají za následek neustálý vývoj moderní měřicí techniky. Vývoj je zaměřen především na technickou kvalitu měřicích zařízení a prostředků, jejich přesnost, měřicí rozsah, univerzálnost použití, produktivitu, zpracování výsledků atd. V neposlední řadě však hraje velkou roli i např. ekonomická dostupnost měřicí techniky.

Na měření úchylek kruhovitosti jsou používány různé metody i měřicí zařízení. Měřicí zařízení můžeme rozdělit na základě více kritérií podle toho, jakou metodu zvolíme, s jakou přesností potřebujeme měřit a jaké množství součástí budeme měřit (jednorázově nebo sériově). Tyto metody a postupy jsou popsány v předcházejících kapitolách.

Měřicí zařízení se dělí na:

- konvenční měřicí přístroje,
- souřadnicové měřicí stroje CMM.

3.6.1 Konvenční měřicí přístroje

Ve výrobě se tvary často kontrolují jednoduchými pomůckami (pravítky, šablonami) a měřicími přístroji (číselníkovými úchylkoměry apod.). Konvenční měření kruhovitosti se provádí měřením v tzv. úhlových podložkách, nebo jiném podobném uspořádání. Tyto metody se nazývají relativní anebo třibodové. Na jejich základě je možno navrhnout přístroje, které mohou být využity ve výrobě a to i přímo na stroji během procesu obrábění. V současné

době je použití relativních metod omezeno tím, že před samotným měřením většinou nepoznáme základní tvarovou úchylku, zda jde o ovalitu nebo více-hran se stejným průměrem. [11]

V laboratorních podmínkách jsou většinou využívány přístroje pracující na principu spojité metody. Významnou roli u nich udává vysoká přesnost měření a jsou pojmenovány jako kruhoměry. Naměřené údaje jsou zpracovávány pomocí softwaru.

Příkladem měřicích přístrojů používaných na měření tvaru jsou: Talyrond, Roundtest, Talysurf, Rondcom a spousta dalších.



a) Talyrond 440



b) Roundtest RA-114

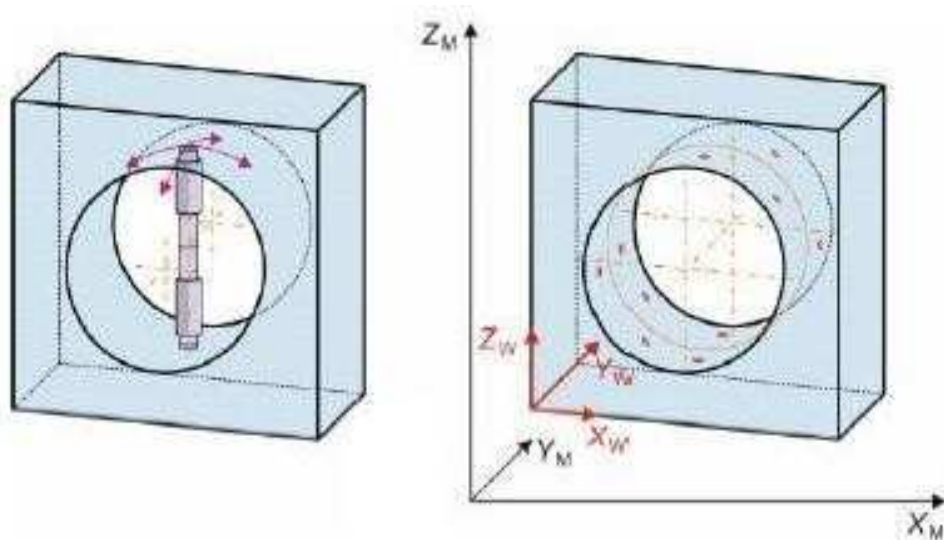
Obr. 3.19 „Konvenční měřicí přístroje“

3.6.2 Souřadnicové měřicí stroje

Souřadnicový měřicí stroj (CMM – Coordinate Measuring Machines) je složitý měřicí systém, který vykonává měření v rovině nebo v prostoru dané souřadnicové soustavy s možností plné automatizace a následného vyhodnocení pomocí softwaru.

Na trhu jsou nabízeny CMM od malých stolových, až po největší mostové systémy, díky kterým je možnost na základě přeměření určit úchylky rozměrů, tvarů a vzájemných poloh (obr. 3.20), nacházejících v normě ISO 1101 [23]. Při použití přesného souřadnicového

měřicího stroje se dá určit na součástce i mikrogeometrie povrchu, přičemž není nutnost použití speciálního zařízení. [11]



Obr. 3.20 „Konvenční a souřadnicová metrologie“ [11]

Současné CMM jsou univerzální flexibilní stroje, určené k provádění přesných a náročných měřicích operací, převážně k měření skříňových součástí a ke kontrole ploch složitějších tvarů, jako jsou např. ozubení nebo turbínové lopatky.

Vyznačují se různými stupni automatizace, od manuálního řízení, až po CNC (Computer Numerical Control) počítačové číslicové řízení [12]. Tyto měřicí stroje zjišťují konkrétní geometrii měřených objektů určením prostorových souřadnic několika měřicích bodů. Z těchto souřadnic se následně pomocí vyhodnocovacího zařízení určí náhradní geometrie objektu. Pro každý tvarový prvek je určen minimální potřebný počet bodů, požadovaný na vytvoření náhradní geometrie. Po měření součásti CMM určí libovolnou geometrickou charakteristiku, jako např. úchylnosti rozměrů, tvarů a vzájemných poloh.

CMM se skládá z mechanické konstrukce, pohonného systému, řízení, měřicího systému, snímacího systému a počítače. [6]



Obr. 3.21 „Souřadnicové měřicí stroje:

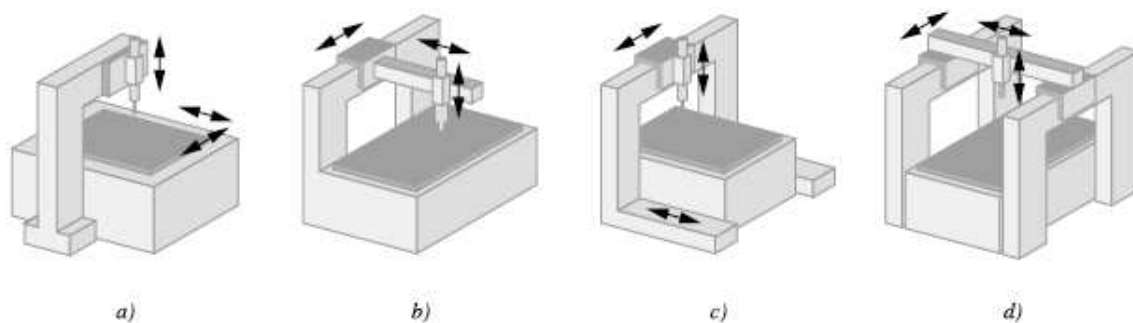
Endeavor, další typ SMS od firmy Sheffield (vlevo), Zeiss Contura G2 (vpravo)“ [17], [18]

Rozdělení CMM

- Podle konstrukce:
 - Jednosouřadnicové měřicí stroje – měření jen v jedné ose X. Dosahuje se velmi malé chyby měřidla v celém rozsahu, a to i při měření velkých rozměrů,
 - Dvousouřadnicové měřicí stroje – měření rozměrů ve dvou navzájem kolmých osách X a Y, tedy v jedné rovině,
 - Třísouřadnicové měřicí stroje – měření ve třech navzájem kolmých osách X, Y a Z, tedy v prostoru. I složité měření ve třech vzájemně kolmých rovinách lze provádět na jedno upnutí měřené součásti. [11]
- Podle konstrukčního řešení polohování (Obr. 3.22):
 - Sloupový typ – malé rozsahy měření. Tuhá konstrukce a dobře přístupné měření součásti. Možnost vybavení kruhovým stolem s úhlovou stupnicí,
 - Výložníkový typ – dobrý přístup k místu měření, avšak omezen konstrukcí. Poměrně krátká osa Y, z důvodu tuhosti systému. Proto je vhodnější pro dlouhé a úzké součásti,
 - Portálový typ – v praxi nejrozšířenější pro střední a velké rozsahy měření. Mají velkou tuhost, což umožňuje dosahovat vysoké přesnosti měření. Přístup

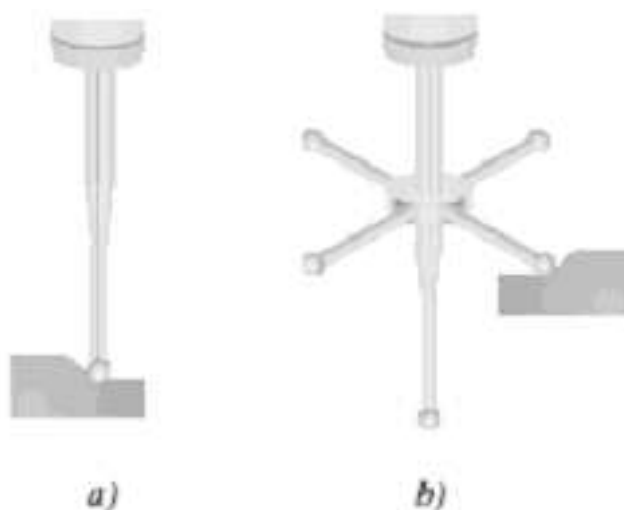
k měřené součásti je omezen konstrukcí. Vyrábí se ve variantě s pevným nebo s pohyblivým portálem,

- Mostový typ – pro největší rozsahy měření. Často využíván v automobilovém a leteckém průmyslu. [11]



Obr. 3.22 Typy souřadnicových měřicích strojů

a) sloupový, b) výložníkový, c) portálový, d) mostový [7]



Obr. 3.23 „Měřicí hroty souřadnicových měřicích strojů“

a) jednoduchý, b) pětiramenný ve tvaru dvojitého kříže [11]

3.7 Analýza harmonických složek profilu

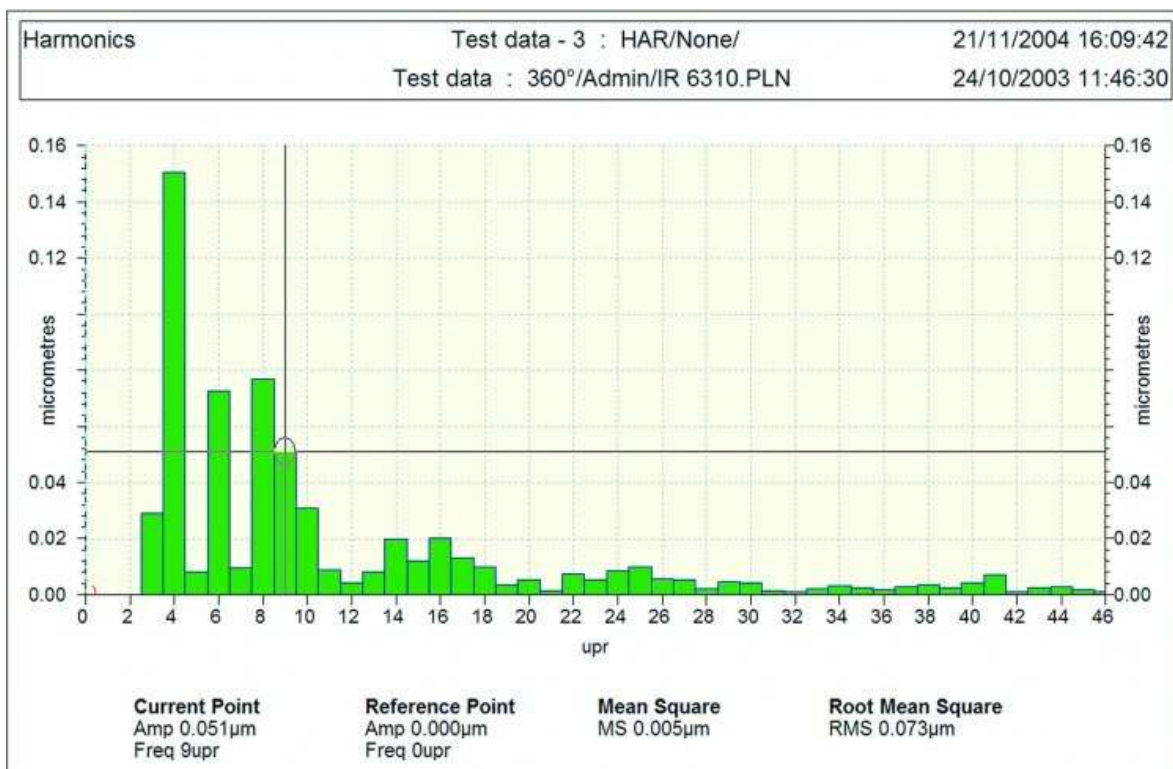
Základním předpokladem pro hodnocení úchylek kruhového tvaru je stanovení jejich velikostí i počtu a třídění podle frekvencí. Během otáčení kruhové součásti a snímání jejího profilu povrchu v jednom bodě projde během jedné otáčky každá nerovnost místem kontroly pouze jednou. Profil povrchu lze nahradit řadou sinusoid, jejichž frekvence je vyjádřena

počtem vln (nerovností) na otáčku UPR (Undulation Per Revolution) - 1, 2,, n - součástí. Uvedené sinusoidy představují harmonické složky ("harmonics") profilu povrchu. Rozdělení harmonických složek profilu povrchu podle frekvencí, stanovení amplitud a fází je prováděno metodou nazvanou Rychlá Fourierova transformace. Aplikace této matematické metody vyžaduje datové soubory obsahující $2n$ bodů. Dříve používané metody doplnění souborů, např. interpolací, někdy mohly nepříznivě ovlivnit vlastnosti profilu povrchu. Taylor Hobson využívá k úpravě souborů Winogradovu transformaci, která nemá vliv na objektivitu hodnocení harmonických složek profilu. Analýzy harmonických složek umožňují posoudit vztahy mezi výsledky měření kruhovitosti a nepřesnostmi výrobních procesů nebo funkčními charakteristikami povrchů, např. hlučností ložisek.

Malé frekvence harmonických složek jsou většinou vztaženy k chybám seřízení a nastavení. Např. 1. harmonická (1 UPR) je způsobena nesoustředností os součásti a rotace. Běžně je tato nesouost odстранěna a případně hodnota úchyly se zaznamenává před zobrazením profilu. 2. harmonická (2 UPR) představuje ovalitu, která může být výsledkem chybného obrábění nebo špatného upnutí a naklonění válcové součásti. Další harmonické nízkých hodnot mohou vznikat upínáním součástí ve sklíčidlech. V případě, že sklíčidlo součást při upínání deformuje, způsobí to po obrobení válcový tvar součásti. Uvolněním ze sklíčidla se tvar součásti "mění" v závislosti na počtu upínacích čelistí sklíčidla. Další harmonické složky s nízkými až středními frekvencemi mohou vznikat chvěním během výrobního procesu. Vyšší frekvence harmonických složek se obvykle spojují se stopami zanechanými od řezného nástroje. Obvykle jsou harmonické složky profilu povrchu využívány implicitně.

Volbou filtru pro analýzu jsou cíleně vyřazeny určité harmonické složky z hodnocení. Např. filtr 1-15 UPR lze použít k vyřazení stop po nástroji a zlepšit tak rozlišení chyb způsobených seřízením a případným chvěním stroje. Využitím filtru 50-500 UPR lze potlačit projevy chvění a umožnit hodnocení stop po nástroji. V některých případech, např. při měření ložisek, je lepší sledovat harmonické složky ve více rozsazích. Každý rozsah totiž představuje a umožňuje hodnocení jiné funkční charakteristiky (např. hlučnost nebo pískání ložisek). Amplitudy frekvencí při určitých rychlostech otáčení ložisek jsou často využívány jako kontrolní parametry.

Společnost Taylor Hobson vyvinula speciální program "Velocity Analysis" pro hodnocení harmonických složek valivých ložisek. Program umožňuje posuzování vlivu jednotlivých harmonických složek profilu povrchu na funkční charakteristiky a stanovení krajních tolerancí pro každý rozsah frekvencí. [16]



Obr. 3.24 „Diagram harmonických složek z analýzy kruhovitosti – nižší hodnoty UPR se vztahují k seřízení a upínání; zdrojem vyšších UPR jsou stroje nebo řezné nástroje.“ [16]

3.8 Chyby měření

Každé měření je zatíženo chybou. Tato chyba měření je definována jako rozdíl mezi naměřenou a skutečnou hodnotou měřené veličiny. Tento rozdíl je nazýván jako *absolutní chyba* měření a je popsána vzorcem:

$$\varepsilon = y - x_0 \quad (\text{Vzor. 3.3})$$

kde: ε – absolutní chyba,
 y – naměřená hodnota,
 x_0 – skutečná hodnota. [8]

Relativní chyba je poměr absolutní chyby měření a skutečné hodnoty měřené veličiny:

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{x_0} \cdot 100[\%] \quad (\text{Vzor. 3.4}) [8]$$

Vznik chyb způsobuje:

- měřidlo – vliv tření, špatné umístění,
- metoda měření,
- prostředí – vliv teploty, vlhkosti atd.,
- lidský faktor – zručnost, zkušenost, kvalifikace a další schopnosti člověka.

Členění chyb podle:

- časová závislost: statické, dynamické,
- možnost vyloučení: odstranitelné, neodstranitelné,
- způsob výskytu: hrubé, systematické, náhodné.

Chyby hrubé – nejčastěji jsou způsobeny chybou měřicího přístroje, měřidla, měřící osoby, metody měření, špatným zpracováním výsledků měření apod. Tyto naměřené hodnoty jsou nepoužitelné a ze souboru naměřených hodnot se vylučují. Musí se odstranit příčina vzniku hrubých chyb a poté se smí pokračovat v dalším měření. [8]

Chyby systematické – způsobeny chybami měřidel způsobenými již při jeho výrobě, nebo jeho používáním. Mohou vznikat nepřesným smontováním měřicího přístroje, nepřesností jeho jednotlivých částí, jejich deformacemi, změnou pracovních podmínek apod. Příčiny vzniku systematických chyb působí soustavně a jednoznačně do smyslu a velikosti. Zjistitelné chyby lze použít ke korekci naměřené hodnoty a mají konkrétní znaménko a hodnotu. Nejistitelné chyby nemají konkrétní hodnotu, jsou uvažovány jako chyby náhodné a zahrnují se do nejistoty měření. [8]

Chyby náhodné – způsobeny příčinami náhodného charakteru co se týče velikosti a směru působení. Tyto chyby mají nejčastěji Gaussovo (normální) rozdělení hustoty pravděpodobnosti jejich výskytu. Určuje se tak, že od výsledné hodnoty měření se odečte střední hodnota, která by vznikla nekonečným počtem měření stejné veličiny provedených za opakovatelných podmínek. [8]

3.9 Nejistoty měření

„Nejistota měření charakterizuje rozsah naměřených hodnot okolo výsledku měření, který lze zdůvodněně přiřadit k hodnotě měřené veličiny. Nejistota měření se týká nejen výsledku měření, ale i měřicích přístrojů, hodnot použitých konstant, korekcí apod., na kterých nejistota výsledku měření závisí. Základem určování nejistot měření je statistický přístup. Předpokládá se určité rozdělení pravděpodobnosti, které popisuje, jak se může udávaná hodnota vychylovat od skutečné hodnoty, resp. pravděpodobnost, s jakou se v intervalu daném nejistotou může nacházet skutečná hodnota.“ [15]

„Mírou nejistoty měření je směrodatná úchylka udávané veličiny. Takto vyjádřená nejistota se označuje jako *standardní nejistota* – u a představuje rozsah hodnot okolo naměřené hodnoty. Standardní nejistoty se dělí na standardní nejistoty typu A a typu B. Udávají se buď samostatně bez znaménka, nebo za hodnotou výsledku se znaménkem \pm .“ [15]

„*Standardní nejistota typu A* – u_A jsou způsobovány náhodnými chybami, jejichž příčiny se považují všeobecně za neznámé. Stanovují se z opakovaných měření stejné hodnoty měřené veličiny za stejných podmínek. Tyto nejistoty se stoupajícím počtem opakovaných měření se zmenšují. Přitom se předpokládá existence náhodných chyb normálním rozdělením.“ [15]

$$u_A = s(\bar{y}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n \cdot (n-1)}} \quad (\text{Vzor. 3.5}) \quad [15]$$

$s(\bar{y})$ - experimentální směrodatná úchylka,

y_i - naměřená hodnota,

\bar{y} - aritmetický průměr naměřených hodnot,

n - počet naměřených hodnot.

„*Standardní nejistota typu B* – u_B jsou způsobovány známými a odhadnutelnými příčinami vzniku. Jejich identifikaci a základní hodnocení provádí experimentátor. Jejich určování nebývá vždy jednoduché. U složitých měřicích zařízení a při zvýšeném požadavku na přesnost, musí se provést podrobný rozbor chyb, což vyžaduje značné zkušenosti.

Tyto nejistoty vycházejí z různých zdrojů a výsledná nejistota typu B je dána jejich sumací - přitom nezávisí na počtu opakovaných měření.

$$u_B = \sqrt{\sum_{i=1}^n u_{Bi}^2} \quad (\text{Vzor. 3.6})$$

u_{Bi}^2 - součet kvadrátů všech zdrojů nejistot typu B.“ [15]

„Kombinovaná standardní nejistota u_C je sumací nejistot typu A a B. Hodnotí-li se výsledek měření touto nejistotou, není třeba rozlišovat nejistoty typu A a B. Kombinovaná standardní nejistota udává interval, ve kterém se s poměrně velkou pravděpodobností může vyskytovat skutečná hodnota měřené veličiny. V praxi se dává této nejistotě přednost.“ [15]

$$u_C = \sqrt{(u_A^2 + u_B^2)} \quad (\text{Vzor. 3.7}) [15]$$

„Rozšířená standardní nejistota U se zavádí v případě, že je třeba zajistit ještě větší pravděpodobnost správného výsledku měření. Získá se tak, že se kombinovaná standardní nejistota u_C vynásobí součinitelem $k_u = 2$.

$$U = k \cdot u \quad (\text{Vzor. 3.8})$$

k – koeficient rozšíření,

u – standardní nejistota.“ [15]

„Při zjišťování jednotlivých standardních nejistot se postupuje podle toho, zda se jedná o přímé nebo nepřímé měření jedné nebo více veličin. Při výpočtech se hodnoty koeficientů a nejistot zaokrouhlují na tři platné číslice. Udávaná výsledná nejistota se zaokrouhluje na dvě platné číslice.“ [15]

4 Experimentální sledování úchylek kruhovitosti

Na základě poznatků z problematiky úchylek kruhovitosti byl stanoven cíl experimentu, a to změřit, vyhodnotit a následně porovnat úchylky kruhovitosti na vnějším průměru ložiskových kroužků, měřených na konvenčním měřicím přístroji. Tyto ložiskové kroužky byly obrobena různými technologiemi obrábění ve společnosti Koyo Bearings Česká republika s.r.o. Jako porovnávané technologie obrábění byly vybrány soustružení, broušení a honování.

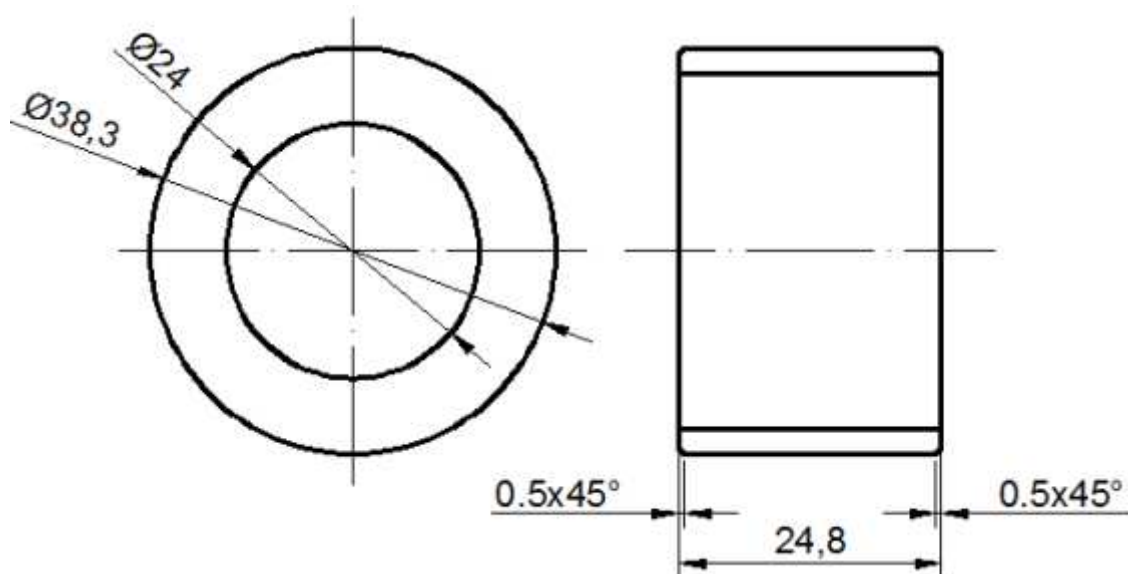
Experimentální část diplomové práce obsahuje popis měřených součástí, použité měřicí techniky pro měření úchylky kruhovitosti a snímání profilu povrchu, získány výsledky měření, statistické vyhodnocení a porovnání výsledků měření úchylek kruhovitosti vzorků získaných po použití jednotlivých technologií obrábění.

4.1 Zkoumané součásti

Pro sledování vlivu technologie obrábění na úchylku kruhovitosti byly zkoumány vnější průměry ložiskových kroužků, opracovaných různými technologiemi obrábění. Zkoumané kroužky byly vyrobeny z chromové oceli pro valivá ložiska 100Cr6 (ČSN 41 4109) a tyto kroužky byly obrobena soustružením, broušením a honováním ve společnosti Koyo Bearings Česká republika s.r.o., kde byly následně i měřeny.

Parametry měřených součástí (*Obr. 4.1*), (*Obr. 4.2*):

- ložiskové kroužky,
- vnější průměr: Ø 38,3 mm,
- vnitřní průměr: Ø 24 mm,
- šířka: 24,8 mm,
- materiál: 100Cr6 (ČSN 41 4109) – chromová ocel pro valivá ložiska (*Obr. 4.3*).



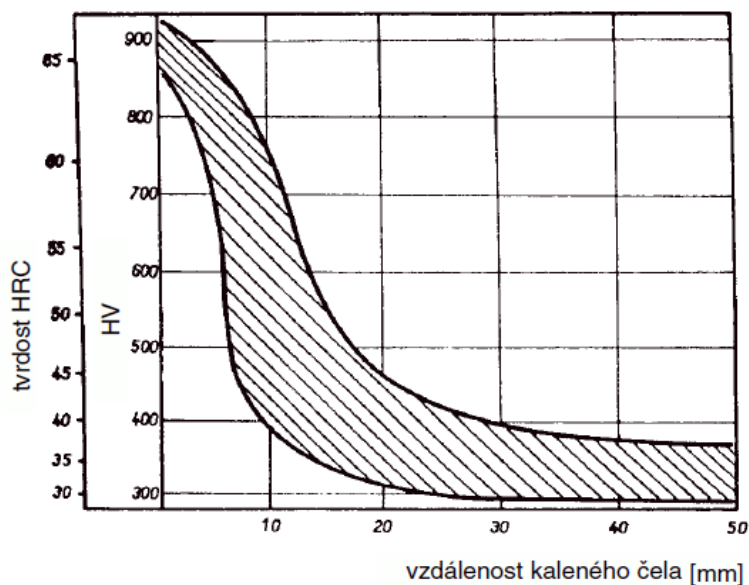
Obr. 4.1 Rozměry měřených součástí



Obr. 4.2 Měřená součást

Chemické složení [hm. %]								
C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Ni + Cu	P	S
0,90–1,10	0,30–0,50	0,15–0,35	1,30–1,65	max 0,30	max 0,25	max 0,50	max 0,027	max 0,030
Polotovary								
[1] předvalky				[4] bezešvé trubky tvářené za tepla				
[2] tyče válcované za tepla				[5] tyče tažené za studena				
[3] výkovky				[6] dráty tažené za studena				
Mechanické vlastnosti								
Polotovary	[1] [2] [3]			[4]	[5] [6]			
Rozměr t, d [mm]	—			—	—			
Stav	.3			.3	.3			
Mez kluzu R _e [MPa] inf.	441			—	441			
Mez pevnosti R _m [MPa]	608–726			608–726	628–765			
Tažnost A ₅ [%] inf. podél	18			18	18			
Kontrakce Z [%] inf.	35			35	35			
Vrbová houževnatost KCU 2 [J.cm ⁻²]	—			—	—			
Tvrdost HB	max 210			max 220	max 225			
Modul pružnosti E [GPa]	213 (při 23 HRC), 210 (při 54 HRC), 202 (při 63 HRC)							
Modul pružnosti va smyku G [GPa]	—							
Teplota [°C] / tvrdost				20	200	400	600	
Modul pružnosti E [GPa]				23 HRC	213	202	188	166
za zvýšených teplot				54 HRC	210	197	182	—
Fyzikální vlastnosti								
Hustota	Měrná tepelná kapacita		Tepelní součinitel roztažnosti		Tepelná vodivost		Rezistivita	
ρ [kg . m ⁻³]	c _p [J . kg ⁻¹ .K ⁻¹]		α [K ⁻¹]		λ _t [W . m ⁻¹ . K ⁻¹]		ρ [Ω . m]	
7 850	480		12,5.10 ⁻⁶		37,26		256.10 ⁻⁹	
Odolnost proti degradačním procesům								
ODOLNOST PROTI KOROZI								
normální								
ODOLNOST PROTI OPOTŘEBENÍ ¹⁾								
HRC		opotřebení [mg . mm ⁻² . m ⁻¹]						
58–59		0,0267						
61–62		0,0240						
ODOLNOST PROTI ÚNAVĚ								
mez únavy v ohybu při symetrickém cyklu [MPa]								
pro: HRC = 58,5–59,0		630						
HRC = 60,5–61,0		715						
HRC = 62,5–63,0		645						
Technologické údaje								
TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ								
žhánání na měkko		720–780 °C		4 h na teplotě, ochlazování v peci				
kalení		820–840 °C		ochlazovat v oleji				
		790–820 °C		ochlazovat ve vodě				
popouštění		150–170 °C		ohřev v oleji, 3 h na teplotě				
nejnižší tvrdost po kalení do oleje ~ 62 HRC								
mikrostruktura ve stavu .3: zrnitý perlit, zbytky lamelárního perlitu jsou dovoleny do 10 %								
tvrdost HRC při teplotě popouštění								
doba popouštění [h]		150 °C	175 °C	200 °C	250 °C			
2		63,0	62,0	60,2	58,0			
4		62,5	61,0	59,1	57,0			
TVAŘITELNOST								
třída tvařitelnosti za tepla 2								
teploty tvářen		1 050–800 °C		ochlazovat na vzduchu				
OBROBITELNOST			soustružení, hoblování		frézování, vrtání		broušení	
polotovary [2] [3]		stav .3	13b	13b		—		
[4]		.3	13b	13b		—		
[5]		.3	12b	12b		—		
Ostatní vlastnosti								
Druh oceli podle způsobu výroby			Barevné značení podle ČSN 42 0010			Třída odpadu podle ČSN 42 0030		
elektroocel			modrá - bílá - oranžová			008		

Obr. 4.3 „Vlastnosti materiálu měřených součástí (100Cr6)“ [19]



Obr. 4.4 Pás prokalitelnosti materiálu měřených součástí [19]

4.2 Měření úchylky kruhovitosti

Úchylka kruhovitosti byla měřena spojitou (skenovací) metodou na konvenčním měřicím přístroji Formtester MMQ 44 CNC od firmy Mahr. Měření bylo provedeno v metrologické laboratoři Olomouckého závodu společnosti Koyo Bearings Česká republika s.r.o. Součásti byly měřeny na vnějším průměru a úchylka kruhovitosti ΔZ byla vyhodnocována metodami referenčních kružnic LSCI, MZCI, MCCI i MICI. Po obvodu bylo snímáno 3600 bodů a rameno snímače o délce 60 mm bylo vykloněno o 10° . Na každé součásti bylo provedeno deset měření v jednom radiálním řezu, pro možnost získání statisticky vyhodnocených výsledků měření.

4.2.1 Konvenční měřicí přístroj Mahr Formtester MMQ 44 CNC

Formtester MMQ 44 CNC od firmy Mahr je velmi přesný, plně automatický, modulární a flexibilní měřicí přístroj, sloužící ke kontrole úchylek tvaru a polohy, dle ISO 1101. Formtester MMQ 44 CNC poskytuje velký měřicí rozsah a zaujme přitom malou plochu pro jeho umístění (Obr. 4.5).



Obr. 4.5 Měřicí přístroj Mahr Formtester MMQ 44 CNC

Formtester MMQ 44 CNC od firmy Mahr je vybaven velmi přesným motorickým sloupkem Z, přináší v porovnání s kruhoměry další možnosti měření úchylek tvaru a polohy. Kromě vyhodnocení úchylek:

- kruhovitost,
- rovinnost,
- soustřednost,
- souosost,
- obvodové házení,
- čelní házení

je s Formtesterem MMQ 44 CNC možné vyhodnocovat:

- válcovitost,
- přímost,
- celkové obvodové házení,
- rovnoběžnost,
- kolmost,
- sklon (vertikální),
- kuželovitost (vertikální),
- tvar kužele.

Popis měřicího zařízení:

- motoricky řízená sonda T7W s 360° rotační funkcí (*Obr. 4.6*),
- plně automatické motoricky řízené centrování a naklápění stolu,
- upínací přípravky (*Obr. 4.7*),
- posuvné rameno o měřicím rozsahu (X, Z): 180, 500 mm,
- další zařízení jako je např. PC s ovládacím a vyhodnocovacím programem s možností výstupu do tiskárny. [14]



Obr. 4.6 Motoricky řízená sonda T7W [14]



Obr. 4.7 „Upínací přípravky“ [14]

Motoricky řízená sonda T7W (*Obr. 4.6*) je vybavena motorickou osou otáčení, která umožňuje postupně nastavit snímací rameno do požadované úhlové polohy, a tím provádět měření na válcových i na čelních plochách. Jelikož má snímač T7W funkci s automatickým vynulováním polohy, může také automaticky bez zásahu obsluhy přepínat mezi vnitřním a vnějším měřením nebo také mezi měřením čelní plochy shora a zdola. Měření i složitých součástí lze provádět plně automaticky. Snímací ramena pro T7W jsou snadno vyměnitelná. [14]



Obr. 4.8 Snímání povrchu kroužku

4.2.2 Podmínky měření

- měřené součásti: ložiskové kroužky,
- přesnost stroje při měření úchylky kruhovitosti při teplotě prostředí $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$:
 $u_p = 0,07 + 0,001 (\mu\text{m} + \mu\text{m}/\text{mm} \text{ měřené výšky})$,
- teplota prostředí: 21°C ,
- vyhodnocovací software: MarForm FORM-PC,
- filtr: 15 vln/otáčku, GAUSS 75%,
- měřicí interval: $0,10^{\circ} \Rightarrow$ snímáno 3600 bodů po obvodu,
- měřicí snímač: dotyk tvaru kuličky o průměru $\varnothing 1,5 \text{ mm}$,
- referenční kružnice: LSCI, MZCI, MCCI, MICI.

4.3 Výsledky měření

V tabulkách naměřených hodnot úchylek kruhovitosti jsou uvedeny průměrné hodnoty ze skupiny deseti měření úchylek kruhovitosti daného kroužku. Zde je uveden vždy jen jeden příklad protokolu z každé skupiny deseti měření, a to s výsledky měření metodami referenčních kružnic LSCI, MZCI, MCCI i MICI, vždy pro výsledek měření s nejmenší hodnotou úchylky kruhovitosti daného vzorku. Pro porovnání získaných hodnot úchylek kruhovitosti po obrábění jednotlivými technologiemi obrábění budou brány v úvahu hodnoty získány metodou referenčních kružnic MZCI, jelikož tato metoda je pro daný účel doporučována jako nejvhodnější. Naopak metoda MICI není vhodná pro měření vnějších průměrů, ale naměřené hodnoty úchylek kruhovitosti této metody zde jsou také uvedeny, při porovnávání však již nebudou brány v úvahu.

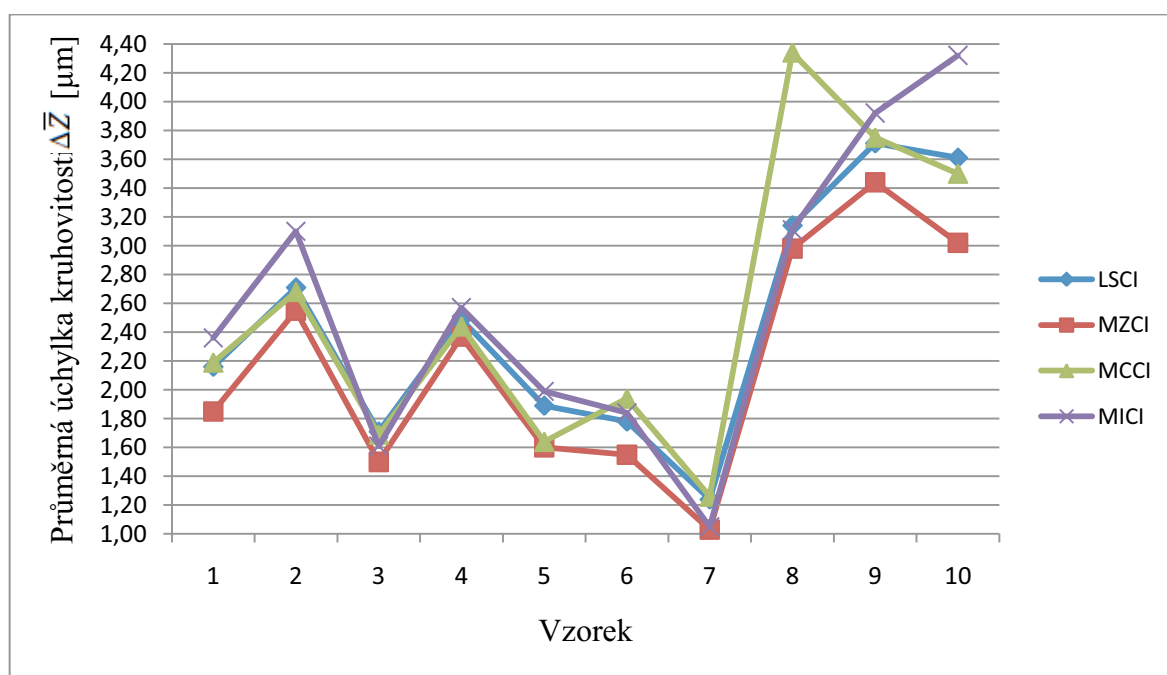
Naměřené hodnoty

- Součásti soustružené, bez tepelného zpracování:

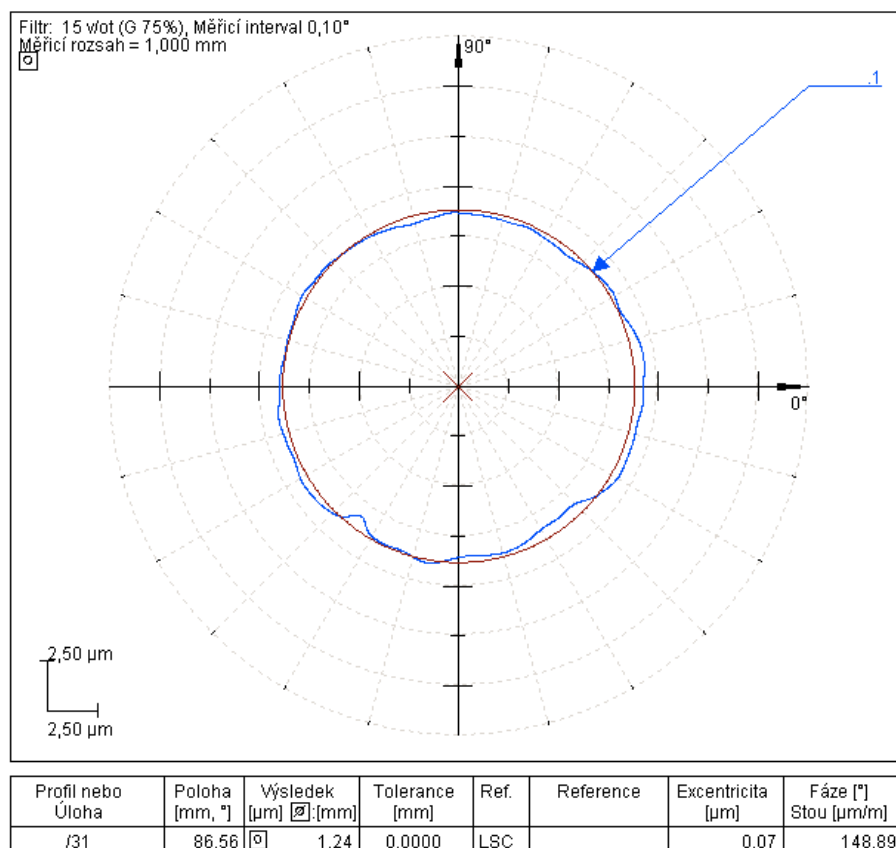
U soustružených kroužků byla metodou MZCI naměřena průměrná hodnota úchylky kruhovitosti $\bar{\Delta Z} = 2,189 \mu\text{m}$ viz. (Tab. 4.1). Příklady profilu měřeného povrchu jsou vyobrazeny v protokolech měření pro všechny metody referenčních kružnic (Obr. 4.10) až (Obr. 4.13). Další ukázky měřených profilů povrchů jsou uvedeny v přílohách (Příloha 1).

Tab. 4.1 Tabulka naměřených hodnot úchylek kruhovitosti soustružených kroužků

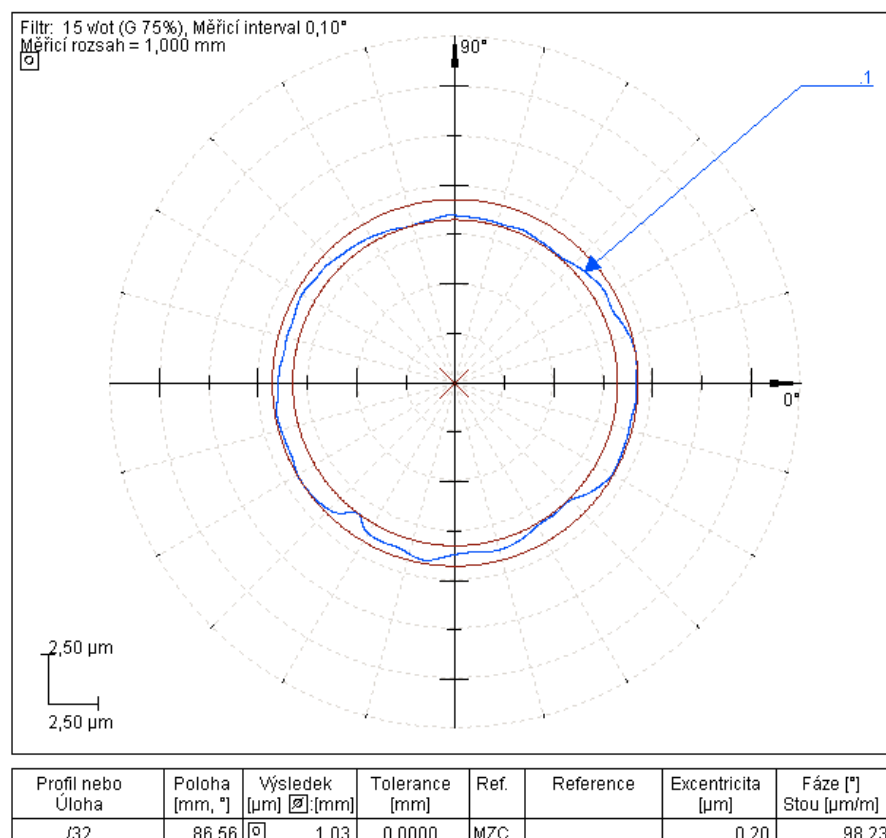
Vzorek č.	Průměrná úchylka kruhovitosti $\bar{\Delta Z}$ [μm]			
	LSCI	MZCI	MCCI	MICI
1	2,16	1,85	2,19	2,36
2	2,71	2,55	2,68	3,10
3	1,71	1,50	1,69	1,61
4	2,49	2,37	2,44	2,57
5	1,89	1,60	1,64	1,99
6	1,78	1,55	1,94	1,84
7	1,24	1,03	1,26	1,05
8	3,14	2,98	4,34	3,11
9	3,71	3,44	3,75	3,92
10	3,61	3,02	3,50	4,32
Průměr [μm]	<i>2,444</i>	<i>2,189</i>	<i>2,543</i>	<i>2,587</i>
Rozptyl u_A [μm]	<i>0,25172</i>	<i>0,23943</i>	<i>0,30510</i>	<i>0,30984</i>



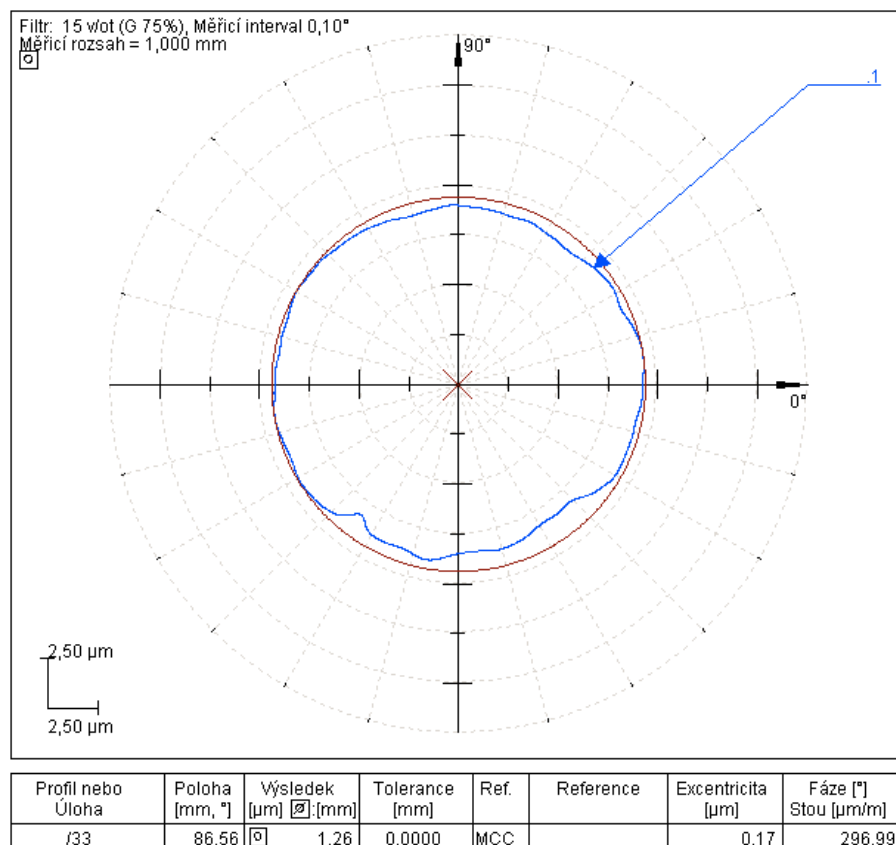
Obr. 4.9 Grafické znázornění úchylek kruhovitosti $\bar{\Delta Z}$ po soustružení



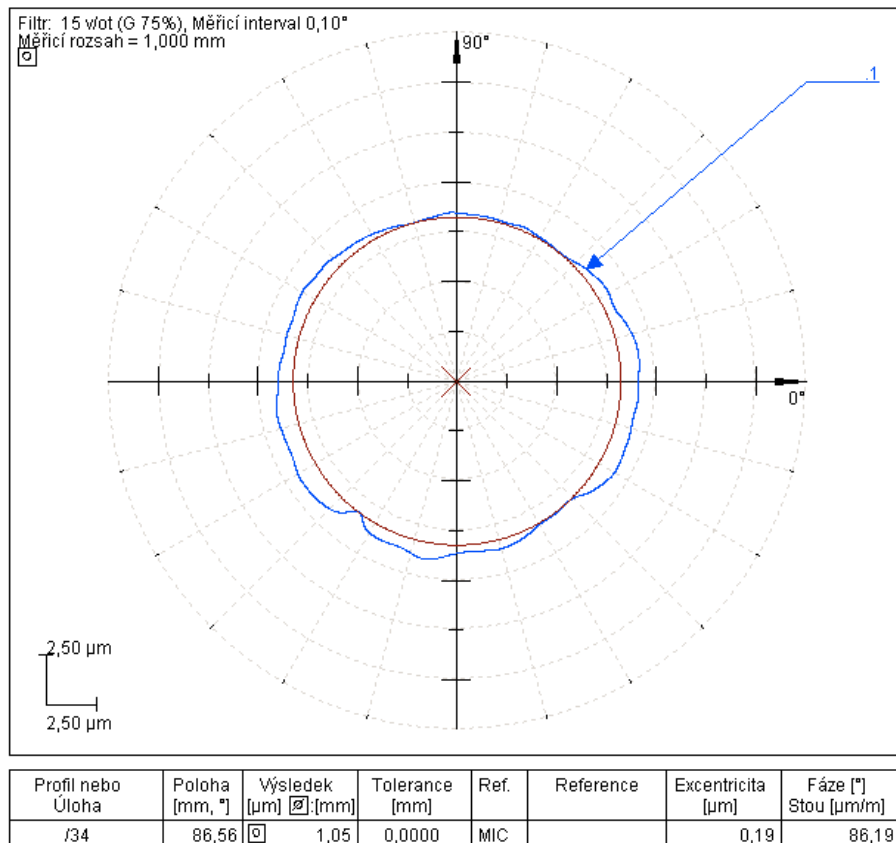
Obr. 4.10 Protokol o měření úchylky kruhovitosti soustruženého kroužku (LSCI)



Obr. 4.11 Protokol o měření úchylky kruhovitosti soustruženého kroužku (MZCI)



Obr. 4.12 Protokol o měření úchylky kruhovitosti soustruženého kroužku (MCCI)



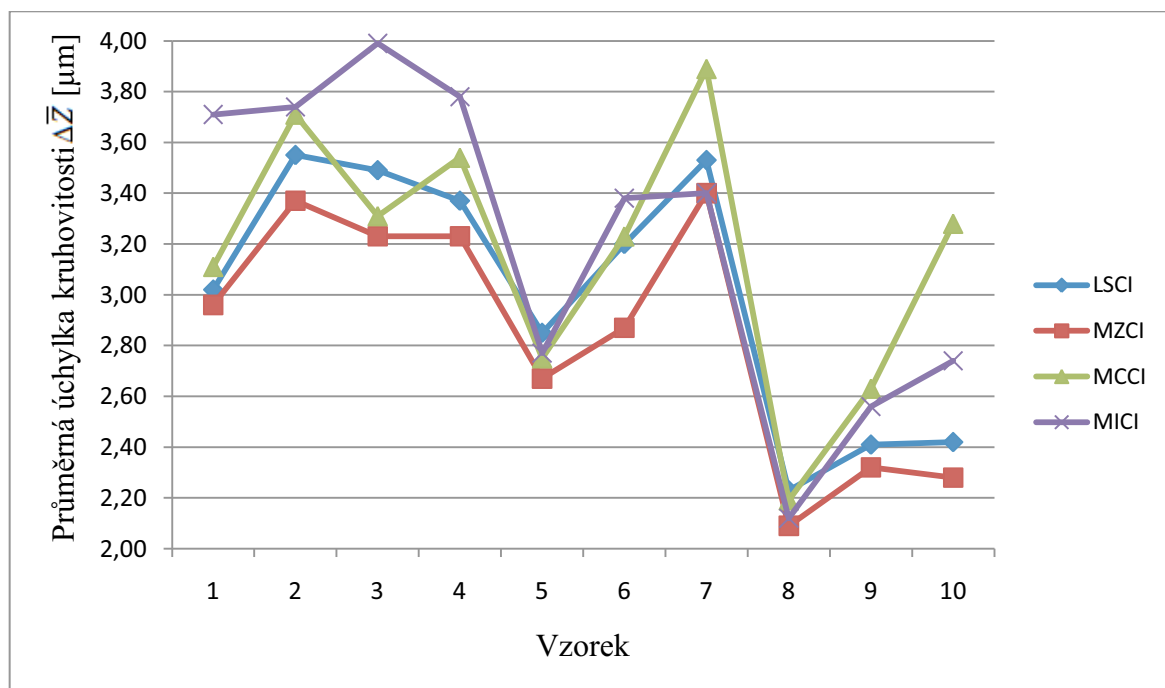
Obr. 4.13 Protokol o měření úchylky kruhovitosti soustruženého kroužku (MICI)

- Vzorky soustružené, následně kalené do solné lázně a broušené:

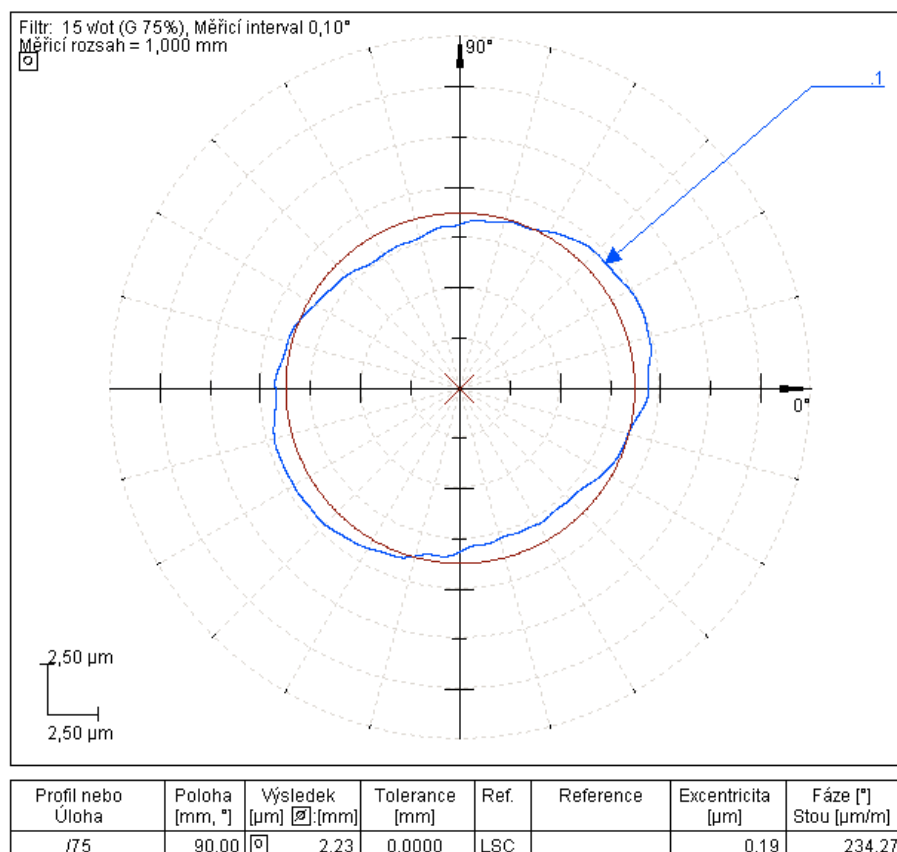
U kroužků dokončených broušením byla metodou MZCI naměřena průměrná úchylka kruhovitosti $\bar{\Delta Z} = 2,978 \mu\text{m}$ viz. (Tab. 4.2). Příklady profilu měřeného povrchu jsou vyobrazeny v protokolech měření pro všechny metody referenčních kružnic (Obr. 4.15) až (Obr. 4.18). Další ukázky měřených profilů povrchů jsou uvedeny v přílohách (Příloha 2).

Tab. 4.2 Tabulka naměřených hodnot úchylek kruhovitosti broušených kroužků

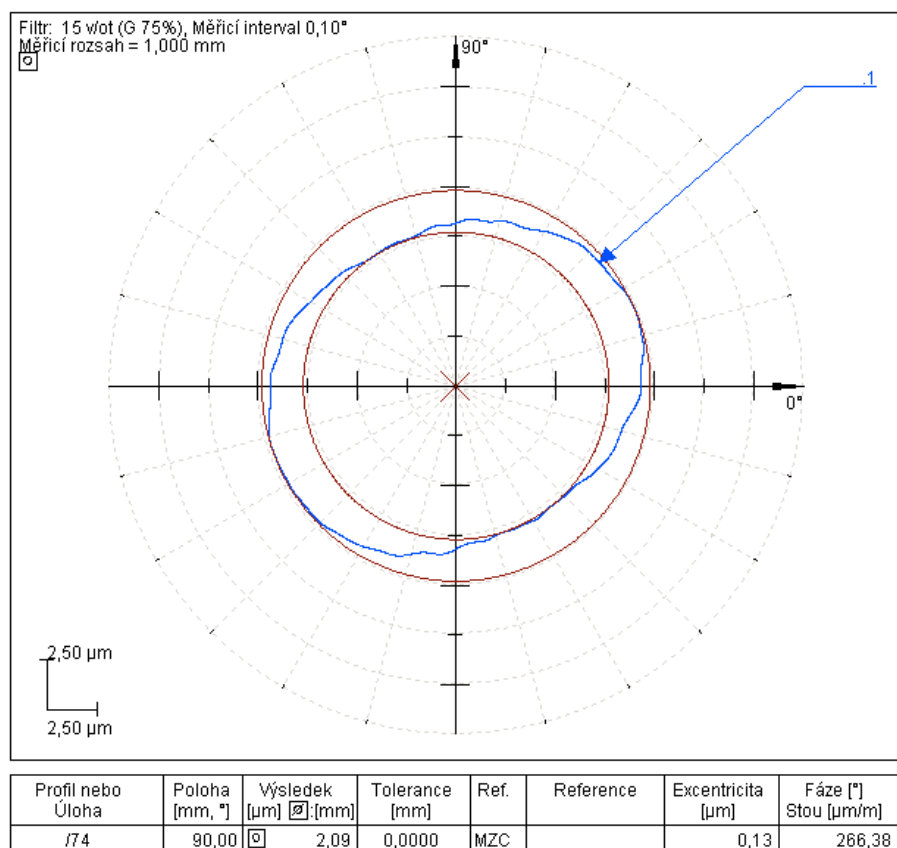
Vzorek č.	Průměrná úchylka kruhovitosti $\bar{\Delta Z}$ [μm]			
	LSCI	MZCI	MCCI	MICI
1	3,02	2,96	3,11	3,71
2	3,55	3,37	3,71	3,74
3	3,49	3,23	3,31	3,99
4	3,37	3,23	3,54	3,78
5	2,85	2,67	2,75	2,77
6	3,20	2,87	3,23	3,38
7	3,53	3,40	3,89	3,40
8	2,23	2,09	2,19	2,12
9	2,41	2,32	2,63	2,56
10	2,42	2,28	3,28	2,74
Průměr [μm]	3,155	2,978	3,216	3,361
Rozptyl u_A [μm]	0,15166	0,14455	0,15537	0,18851



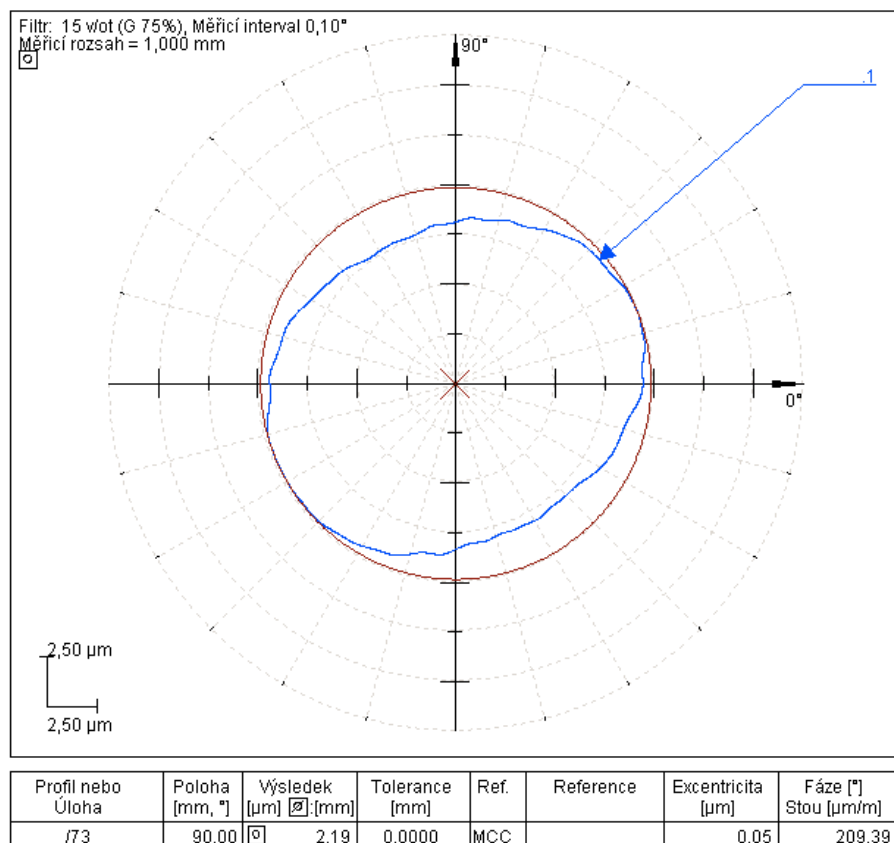
Obr. 4.14 Grafické znázornění úchylek kruhovitosti $\bar{\Delta Z}$ po broušení



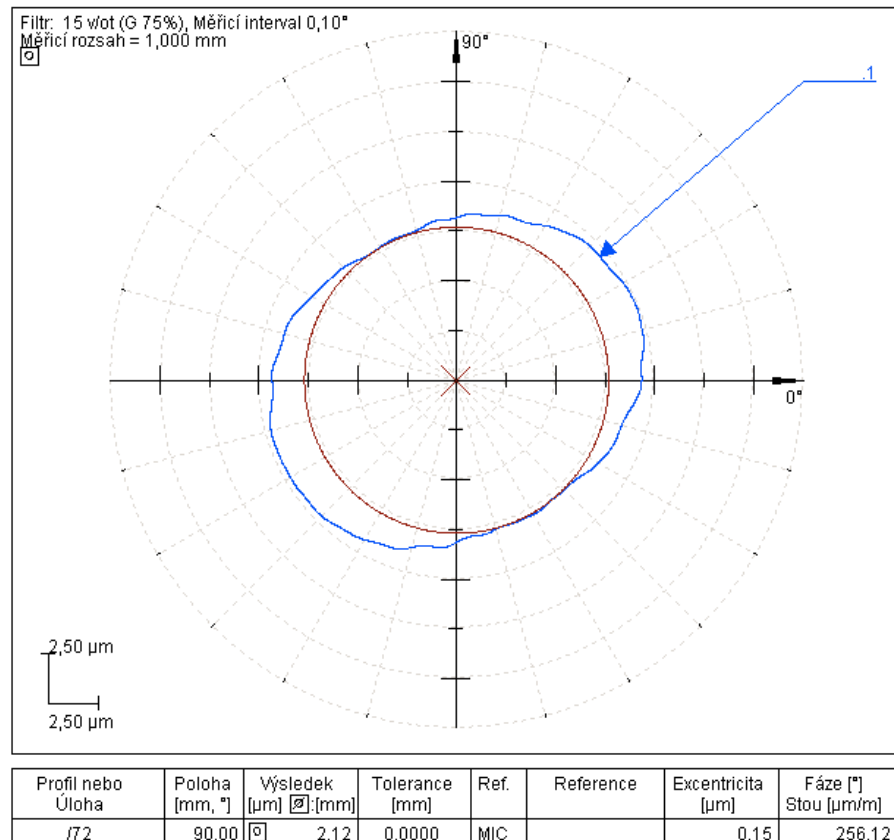
Obr. 4.15 Protokol o měření úchytky kruhovitosti broušeného kroužku (LSCI)



Obr. 4.16 Protokol o měření úchytky kruhovitosti broušeného kroužku (MZCI)



Obr. 4.17 Protokol o měření úchylky kruhovitosti broušeného kroužku (MCCI)



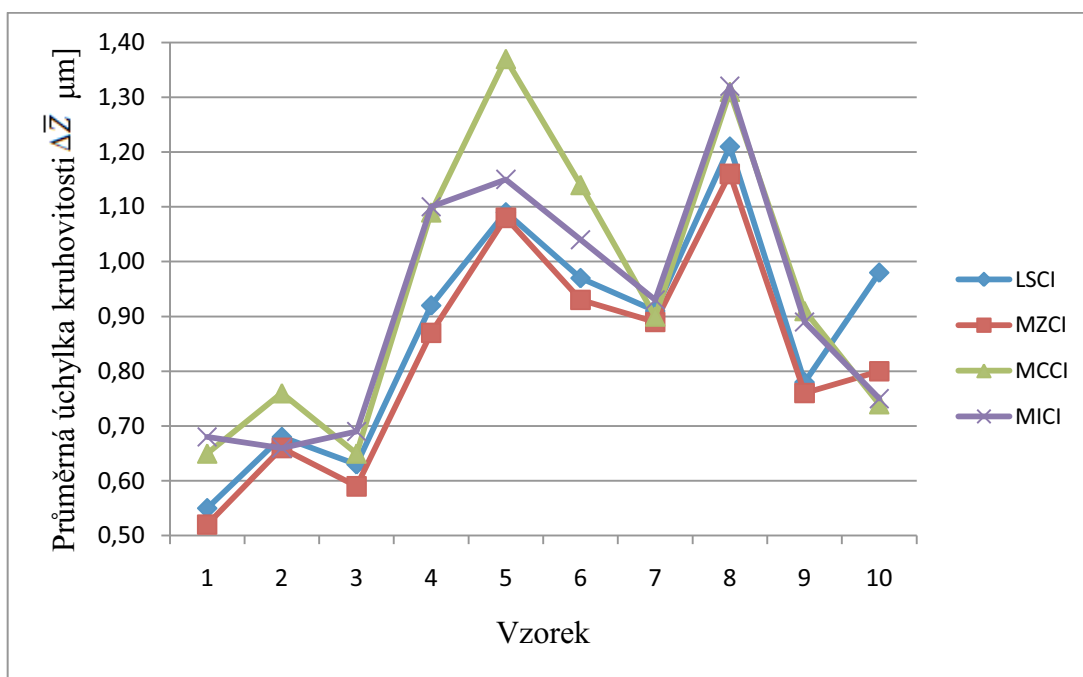
Obr. 4.18 Protokol o měření úchylky kruhovitosti broušeného kroužku (MICI)

- Vzorky soustružené, následně kalené do solné lázně, broušené a honované:

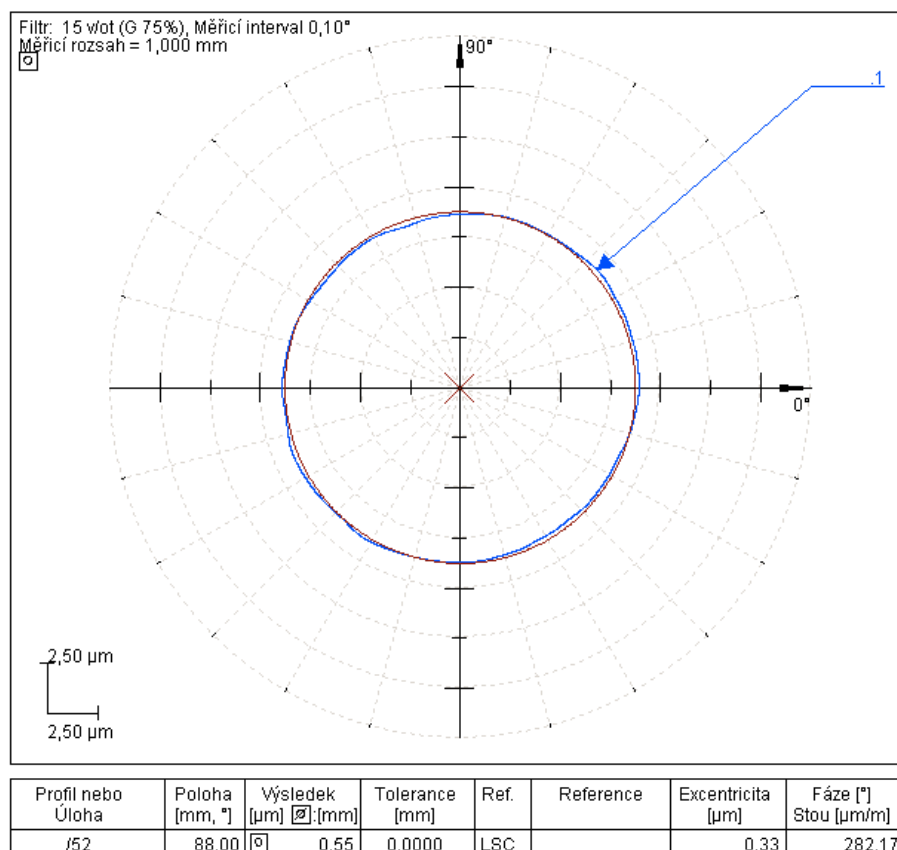
U kroužků dokončených honováním byla metodou MZCI naměřena průměrná úchylka kruhovitosti $\bar{\Delta Z} = 0,826 \mu\text{m}$ viz. (Tab. 4.3). Příklady profilu měřeného povrchu jsou vyobrazeny v protokolech měření pro všechny metody referenčních kružnic (Obr. 4.20) až (Obr. 4.23). Další ukázky měřených profilů povrchů jsou uvedeny v přílohách (Příloha 3).

Tab. 4.3 Tabulka naměřených hodnot úchylek kruhovitosti honovaných vzorků

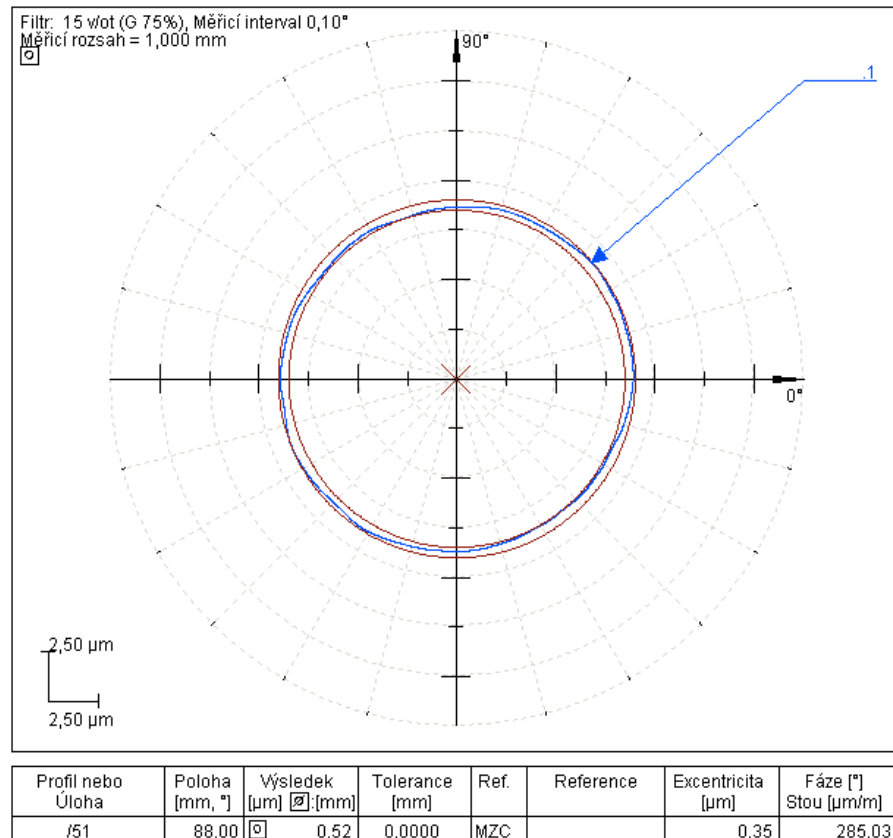
Vzorek č.	Průměrná úchylka kruhovitosti $\bar{\Delta Z}$ [μm]			
	LSCI	MZCI	MCCI	MICI
1	0,55	0,52	0,65	0,68
2	0,68	0,66	0,76	0,66
3	0,63	0,59	0,65	0,69
4	0,92	0,87	1,09	1,10
5	1,09	1,08	1,37	1,15
6	0,97	0,93	1,14	1,04
7	0,91	0,89	0,90	0,93
8	1,21	1,16	1,31	1,32
9	0,78	0,76	0,91	0,89
10	0,98	0,80	0,74	0,75
Průměr [μm]	0,872	0,826	0,952	0,921
Rozptyl u_A [μm]	0,06280	0,06122	0,07912	0,06839



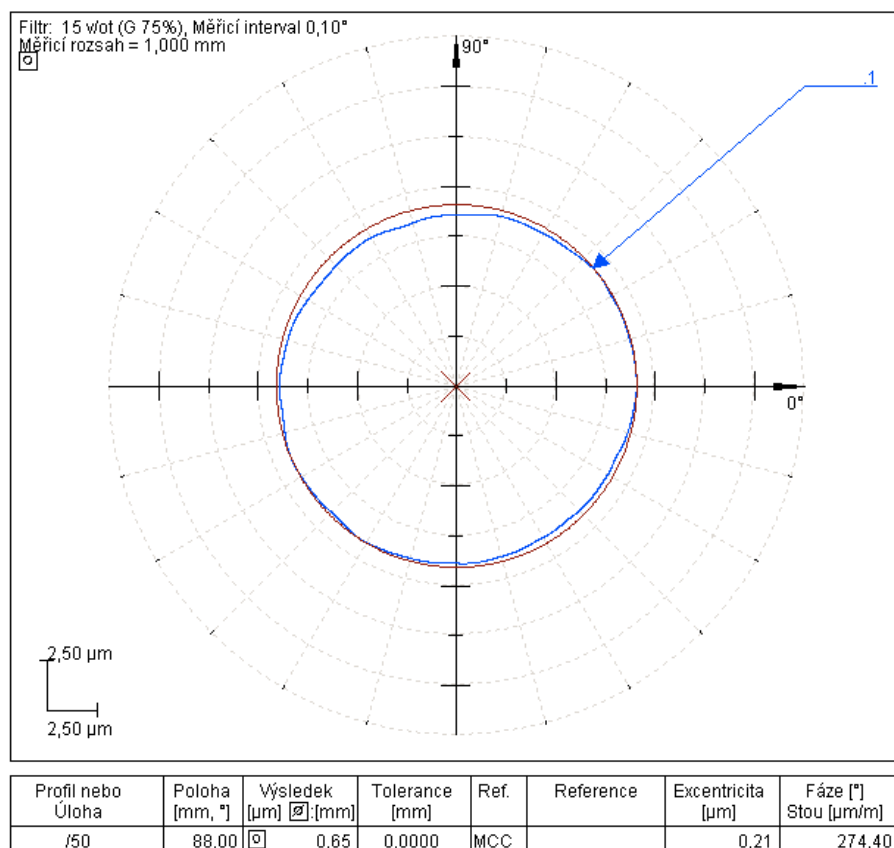
Obr. 4.19 Grafické znázornění úchylek kruhovitosti $\bar{\Delta Z}$ po honování



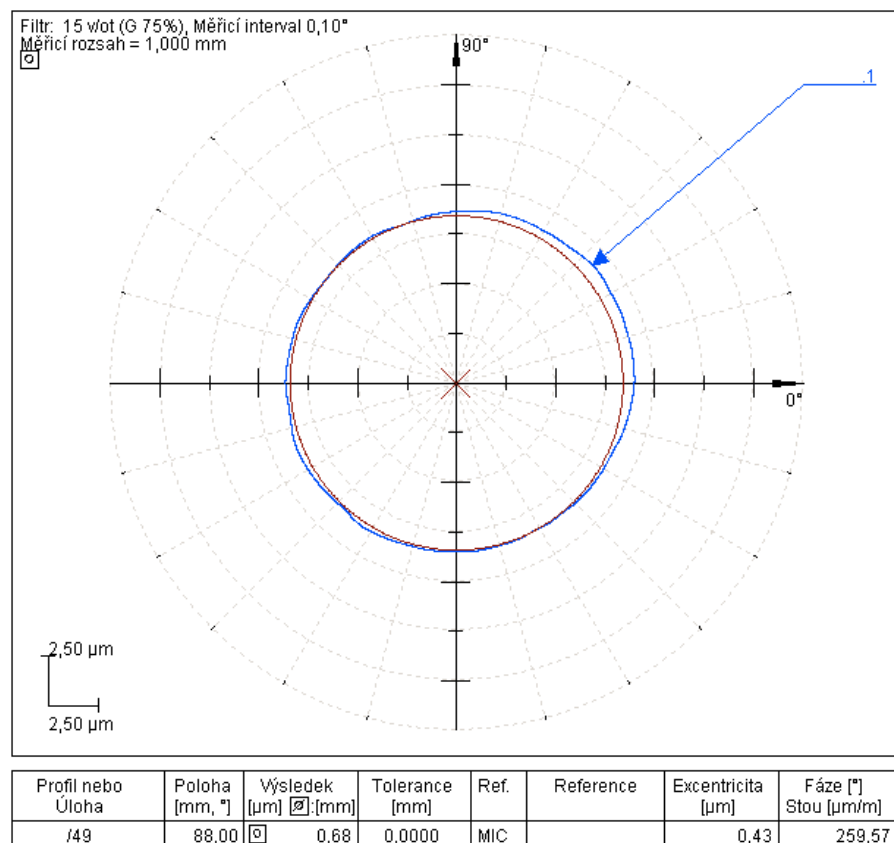
Obr. 4.20 Protokol o měření úchylky kruhovitosti honovaného kroužku (LSCI)



Obr. 4.21 Protokol o měření úchylky kruhovitosti honovaného kroužku (MZCI)



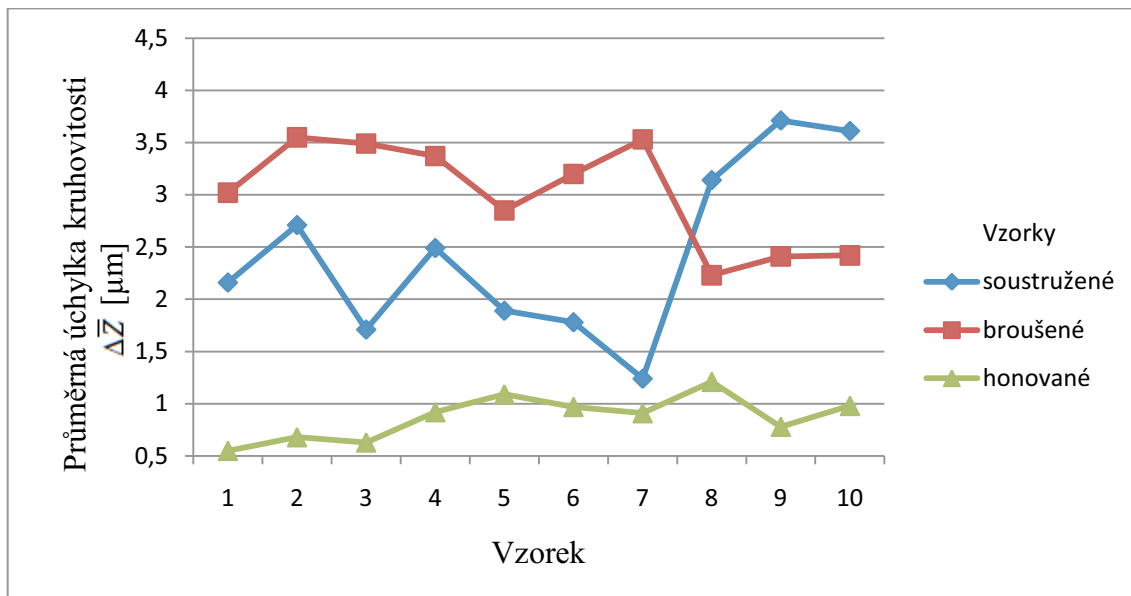
Obr. 4.22 Protokol o měření úchylky kruhovitosti honovaného kroužku (MCCI)



Obr. 4.23 Protokol o měření úchylky kruhovitosti honovaného kroužku (MICI)

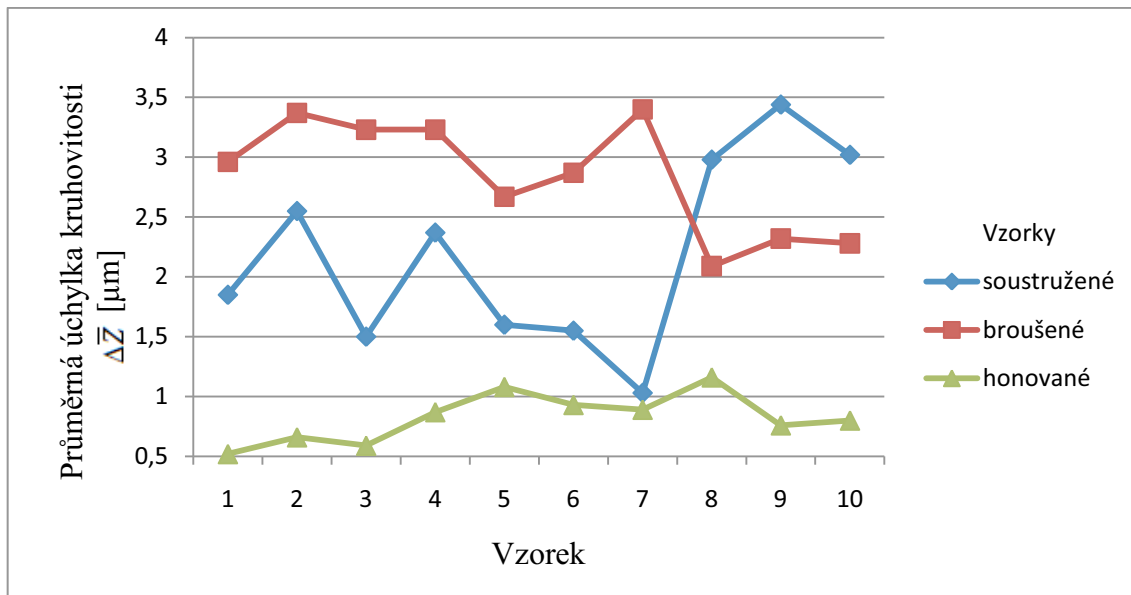
V následujících grafech, (Obr. 4.24) až (Obr. 4.27), jsou znázorněny výsledky měření úchylek kruhovitosti vzorků vyhodnoceny jednotlivými metodami referenčních kružnic.

Metodou LSCI byly získávány druhé nejmenší hodnoty úchylek kruhovitosti.



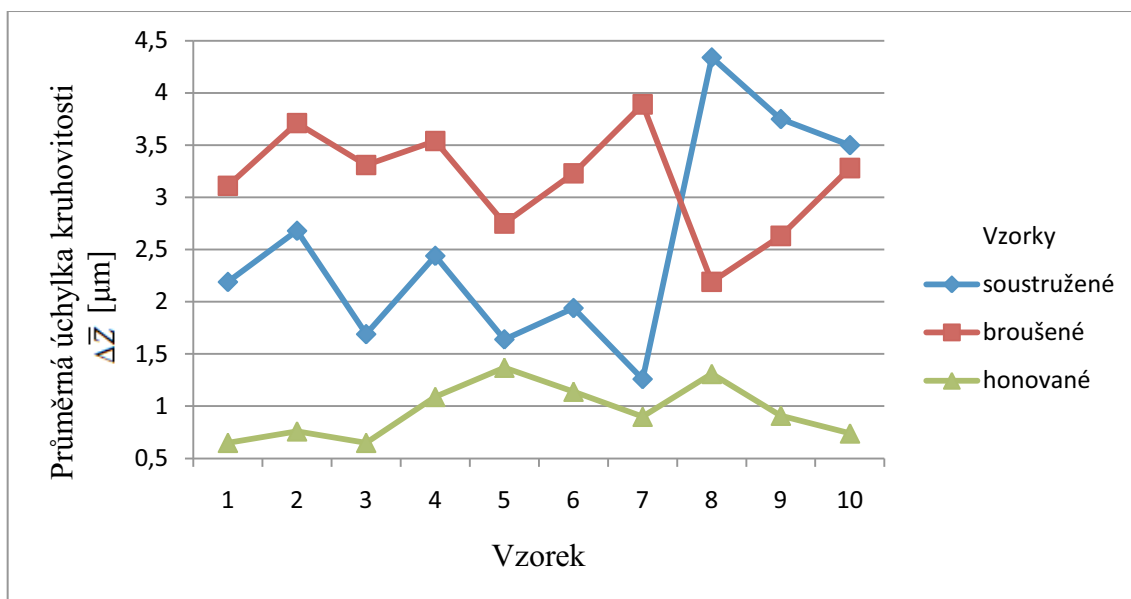
Obr. 4.24 Úchylky kruhovitosti vyhodnoceny metodou referenčních kružnic LSCI

Metodou MZCI byly získávány nejmenší hodnoty úchylek kruhovitosti.



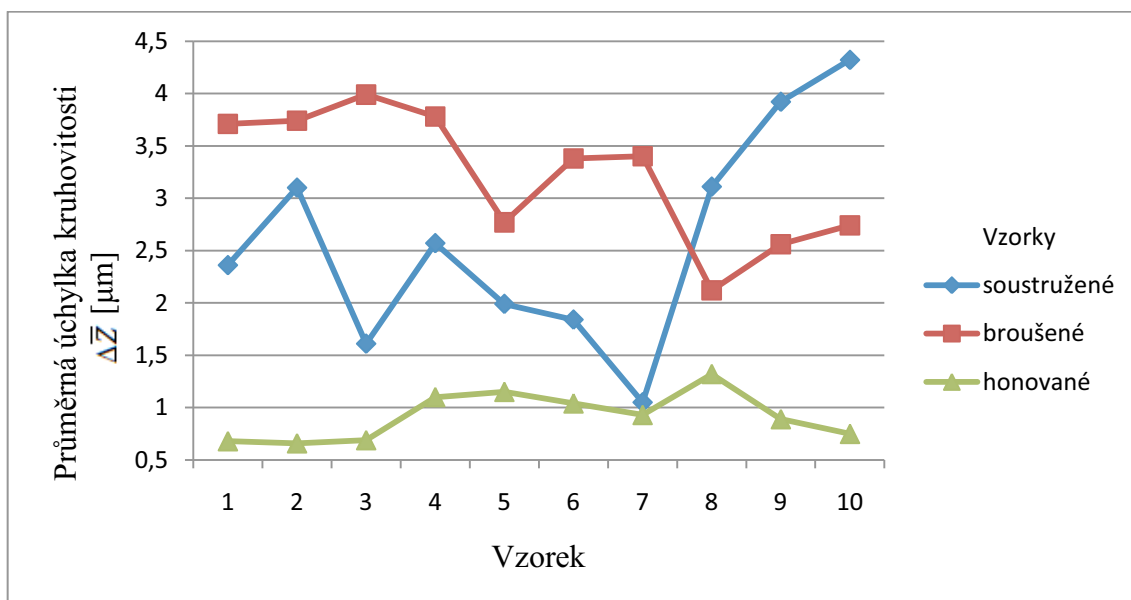
Obr. 4.25 Úchylky kruhovitosti vyhodnoceny metodou referenčních kružnic MZCI

Metodou MCCI byly získávány ještě nepatrně větší hodnoty úchylek kruhovitosti než metodou LSCI.



Obr. 4.26 Úchylky kruhovitosti vyhodnoceny metodou referenčních kružnic MCCI

Metodou MICI byly získávány podobné hodnoty úchylek kruhovitosti jako u metody MCCI, avšak jak již bylo zmíněno, tato metoda není vhodná pro daný účel měření.



Obr. 4.27 Úchylky kruhovitosti vyhodnoceny metodou referenčních kružnic MICI

5 Vyhodnocení

Náplní diplomové práce bylo zjišťování vlivu technologie obrábění na úchylku kruhovitosti a na tvar profilu povrchu při obrábění ložiskových kroužků z chromové oceli pro valivá ložiska 100Cr6, ve společnosti Koyo Bearings Česká republika s.r.o. Měření úchylek kruhovitosti i vyhodnocení tvaru profilu povrchu obrobených ložiskových kroužků bylo realizováno na měřicím přístroji MAHR Formtester MMQ44CNC a následně vyhodnoceno na počítači softwarem MarForm FORM-PC. Přesto, že byly úchylky kruhovitosti naměřeny i vyhodnoceny metodami referenčních kružnic LSCI, MZCI, MCCI i MICI, tak pro závěrečné porovnání jednotlivých technologií obrábění jsou brány v úvahu pouze hodnoty získané metodou referenčních kružnic MZCI, protože tato metoda je pro daný účel doporučována jako nejvhodnější.

Sledovanými technologiemi obrábění bylo soustružení, broušení a honování. Nejdříve byly měřeny ložiskové kroužky soustružené, u kterých byla metodou MZCI naměřena průměrná hodnota úchylky kruhovitosti $\bar{\Delta Z} = 2,189 \mu m$.

Další sledované ložiskové kroužky byly broušeny po tepelném zpracování kalením do solné lázně. U těchto kroužků byla metodou MZCI naměřena průměrná hodnota úchylky kruhovitosti $\bar{\Delta Z} = 2,978 \mu m$. Broušením se tedy úchylka kruhovitosti nezmenšila, ale naopak se trochu zvýšila a navíc došlo k mírné deformaci tvaru profilu povrchu kroužků do oválnosti, jak je vidět na protokolech měření, viz. (Obr. 4.15) až (Obr. 4.18). To bylo s největší pravděpodobností způsobeno tepelným zpracováním kalením, což mívá ve většině případů nežádoucí vliv právě na deformaci tvaru součásti. Přestože bylo použito kalení do solné lázně, tak je z výsledků zřejmé, že použité broušení nebylo dostačující k odstranění těchto způsobených tvarových nepřesností, ani ke zmenšení úchylky kruhovitosti. V případě použití klasického kalení do oleje by docházelo ještě k větším tvarovým deformacím výrobků, což by mělo ještě výrazněji negativní vliv na kruhovitost a další důležité parametry produktu. V Olomouckém závodě Koyo Bearings Česká republika s.r.o. je však používáno pouze kalení do solné lázně.

Poslední sledované kroužky byly dokončeny honováním. U těchto kroužků byla metodou MZCI naměřena průměrná hodnota úchylky kruhovitosti $\bar{\Delta Z} = 0,826 \mu m$. Je tedy zřejmé, že honováním bylo oproti předchozímu obrábění dosaženo výrazně nižší úchylky

kruhovitosti, oproti předcházejícímu broušení více než trojnásobně. Také je z protokolů měření zřejmé, že byla odstraněna válcovitost tvaru a tvar profilu povrchu je bez větších nepřesností a výstupků, viz. (Obr. 4.20) až (Obr. 4.23).

Jak je z výsledků měření (Tab. 5.1) patrné, co se týká úchylky kruhovitosti, je honování po předchozích metodách obrábění velmi prospěšné. Nejen že se výrazně zmenší úchylka kruhovitosti, ale také dojde ke značnému zpřesnění profilu povrchu součásti.

Tab. 5.1 Průměrné hodnoty úchylek kruhovitosti naměřených metodou MZCI po použití jednotlivých technologií obrábění

	Postupně použité technologie obrábění			
	1. Soustružení	Kalení	2. Broušení	3. Honování
Průměrná úchylka kruhovitosti $\Delta\bar{Z}$ [μm]	2,189		2,978	0,826

Při porovnání výsledků úchylek kruhovitosti vyhodnocených jednotlivými metodami referenčních kružnic, tedy metodami MZCI, LSCI, MCCI a MICI, lze konstatovat, že nejmenší hodnoty úchylek kruhovitosti byly získány metodou MZCI. Tato metoda byla pro daný účel měření uvažována jako nejvhodnější. Druhé nejmenší hodnoty byly získány metodou LSCI. Tato metoda je obecně nejužívanější při měření úchylek kruhovitosti. Nepatrně větší hodnoty byly získány metodou MCCI. Hodnoty úchylek kruhovitosti získány metodou MICI se prolínaly s hodnotami metody MCCI. Tato informace je však brána jako bezvýznamná, jelikož jak již bylo zmíněno, metoda referenčních kružnic MICI není vhodná pro daný účel měření vnějších průměrů.

Zajisté by bylo vhodné všechny tyto teorie ještě prozkoumat dalšími měřeními na jiných přístrojích a měřených součástech.

6 Závěr

Diplomová práce se věnovala a přináší poznatky z oblasti úchylek kruhovitosti, jejich měření a hodnocení, příčin jejich vzniku a vlivu technologie obrábění na jejich velikost. Úchylka kruhovitosti je významný parametr při hodnocení kvality vyráběných součástí. Doposud nejčastěji využívaným měřicím zařízením pro měření úchylky kruhovitosti jsou moderní měřicí zařízení, které spojitě skenují povrch součástí. Využívají se k tomu konvenční měřicí přístroje a častěji souřadnicové měřicí stroje. Právě konvenční měřicí přístroj byl použitý při zpracování této práce.

V experimentální části bylo provedeno měření úchylky kruhovitosti na vnějším průměru na jednom typu součásti, avšak vždy obrobene odlišnou technologií obrábění. Cílem experimentu bylo porovnat a vyhodnotit výsledky naměřených hodnot úchylek kruhovitosti po použití různých technologií obrábění ve společnosti Koyo Bearings Česká republika s.r.o. Sledovanými technologiemi obrábění bylo soustružení, broušení a honování. Technologie výroby součástí valivých ložisek je postavena na postupném zpřesňování rozměrů, tvarů i polohy ploch včetně úchylek kruhovitosti, jednotlivými operacemi technologického postupu.

Na základě dosažených výsledků v práci lze konstatovat, že soustružením bylo dosahováno menší úchylky kruhovitosti než broušením. To může být ovlivněno tepelným zpracováním součástí před broušením, což má nežádoucí vliv na tvarovou deformaci součástí, ale i nesprávně seřízenou (nastavenou) brusku, kdy dochází k regenerativnímu efektu, tj. k překopírování úchylek kruhovitosti, a tak se nedosáhne požadovaného zpřesnění. Jako poslední technologie obrábění bylo sledováno honování. Honováním byla dosažena výrazně nižší úchylka kruhovitosti, oproti soustružení a broušení více než trojnásobně nižší.

Jako nejúčinnější technologie obrábění pro dosažení nízké úchylky kruhovitosti a co nejvhodnějšího profilu povrchu při výrobě ložiskových kroužků ve společnosti Koyo Bearings Česká republika s.r.o. je tedy honování. Společnost má tuto technologii vždy jako konečnou, což se jeví z hlediska dosažení nízké úchylky kruhovitosti a vhodného profilu povrchu kroužků jako vhodné.

Bylo by vhodné práci rozšířit a zaměřit se ještě i dalším aspektům, které mají vliv na úchylku kruhovitosti a nebyly v této práci řešeny.

Seznam použité literatury

- [1] KOYO BEARINGS ČESKÁ REPUBLIKA S.R.O. *Interní materiály společnosti*.
- [2] JOCHMANN A., ADAMČÁK M., ŠPAČEK J.: Valivé ložiska, Bratislava: Alfa 1984. 39 s.
- [3] PERNIKÁŘ, J. TYKAL, M. VAČKÁŘ, J. *Jakost a metrologie, část Metrologie*. VUT. Brno: Akademické nakladatelství Cerm, 2002. s. 1-151. ISBN: 80-214-1997-0..
- [4] MEDVECKÝ Š., ČILLÍK L., BARYSZ I., ŽARNAY M., HRČEKOVÁ A., BRONČEK J., KUČERA L. *Základy konštruovania*. Žilina: EDIS Žilina, 1999.
- [5] HUMIENNY, Z., i inni: *Specyfikacja geometrii wyrobów (GPS), Podręcznik europejski*. Wydawnictwo Naukowe. Warszawa: Techniczne, 2004. 540 s.
- [6] KUREKOVÁ, E., GABKO, P., HALAJ, M. *Technické meranie - Zväzok II*. Bratislava: Ing. Peter Juriga - Grafické štúdio. 2005. 396-413 s. ISBN 80-89112-04-8, Modul M14.
- [7] CHUDÍ V., PALENČÁR R., KUREKOVÁ E., HALAJ M. *Meranie technických veličín*. Vydavateľstvo STU, 1. vydanie, 1999. ISBN 80-227-1275-2. 607-611 s.
- [8] TICHÁ Š. *Strojírenská metrologie – část 1*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní, 2008. 104 s. ISBN 978-80-248-0671-6.
- [9] SANDVIK COROMANT: *Technická příručka obrábění*. Švédsko: ELANDERS, 2005, C-2900:3CZE/01.
- [10] PAZDERA, M. *Hodnocení úchylky kruhovitosti a její využití v technické praxi : Diplomová práce*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava Fakulta strojní, 2010. 101 s., 1 příl.
- [11] OČENÁŠOVÁ, L. *Príspevok k hodnoteniu odchýlky kruhovitosti pri meraní na súradnicovom meracom stroji : Doktorská disertační práce*. Žilina: Žilinská univerzita Fakulta strojní, 2008. 104 s., 35 příl.
- [12] NENÁHLO Č.: *Souřadnicová měřicí technika*. [online]. [cit. 2010-12-02]. Praha: Česká metrologická společnost Praha. Dostupný z WWW: <<http://www.strojarstvo.sk/docwww/SK/290/290.pdf>>.
- [13] MITUTOYO. *Geometrické úchylky tvaru a polohy*. [online]. [cit. 2011-03-12]. Dostupný z WWW: <http://www.mitutoyo-czech.cz/cz/pdf/KMG_plakat%20A3_17_9-final.pdf>.
- [14] MAHR TECHNOLOGY. *Výroba měřidel a přesných přístrojů pro celý svět*. [online]. [cit. 2011-01-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.mahr.cz/>>.
- [15] NEJISTOTY MĚŘENÍ. [online]. [cit. 2011-01-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.fs.cvut.cz/tem/nejistoty/nejistoty1.pdf>>.

- [16] MM PRŮMYSLOVÉ SPEKTRUM. *Optimalizace měření kruhovitosti povrchu*. [online]. [cit. 2011-02-05]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/optimalizace-mereni-kruhovitosti-povrchu>>.
- [17] MM PRŮMYSLOVÉ CENTRUM. *Souřadnicové měřicí stroje pro výrobní provozy*. [online]. [cit. 2011-04-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/souradnicove-merici-stroje-pro-vyrobn-provozy>>.
- [18] MEOPTA. *3D měření*. [online]. [cit. 2011-04-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.meopta.com/cz/3d-mereni-1404041247.html>>.
- [19] OCELI K ZUŠLECHŤOVÁNÍ. *Chromová ocel pro valivá ložiska*. Ústav materiálových věd a inženýrství, 2006. [online]. [cit. 2011-03-10]. Dostupný z WWW: <<http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/HSR/04%20-%20Oceli%20k%20zuslechtovani%20-%20Priloha02.pdf>>.
- [20] ČSN P ISO/TS 12181-1 (01 4151). *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Kruhovitost – Část 1: Slovník a parametry kruhovitosti*. 2005.
- [21] ČSN ISO 4291 (01 4411). *Metody hodnocení úchylek kruhovitosti – Měření změn poloměru*. 1994.
- [22] ČSN ISO 4292 (01 4412). *Metody hodnocení úchylek kruhovitosti – Měření dvou a tříbodovou metodou*. 1994.
- [23] EN/ISO 1101. *Geometrical Product Specification (GPS) – Geometrical Tolerancing - Tolerancing of Form, Orientation, Location and Run-out. International Standard*. 2004.
- [24] STN ISO 6318. *Meranie kruhovitosti. Termíny, definície a parametre kruhovitosti (01 4410)*. Slovenský ústav technickej normalizácie. 1995.
- [25] ISO 10360 – 1:2000. *Geometrické špecifikácia výrobkov (GPS) – Akceptačné a verifikačné skúšky súradnicových meracích strojov (CMM)*. 2001.

Seznam příloh

- Příloha 1*** Ukázky záznamů měření profilů povrchů soustružených součástí, vyhodnocených metodou MZCI.
- Příloha 2*** Ukázky záznamů měření profilů povrchů broušených součástí, vyhodnocených metodou MZCI.
- Příloha 3*** Ukázky záznamů měření profilů povrchů honovaných součástí, vyhodnocených metodou MZCI.